



# **RESTRIÇÕES DE GARRAS MANIPULADORAS DENTRO DO PROBLEMA DE EMPACOTAMENTO DE PALETES DO PRODUTOR ? UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA**

**JOÃO PEDRO WOITCHY BARBOSA**

novembro de 2018

# RESTRIÇÕES DE GARRAS MANIPULADORAS DENTRO DO PROBLEMA DE EMPACOTAMENTO DE PALETES DO PRODUTOR – UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA.

João Pedro Woitchy Barbosa

1170165

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



# RESTRIÇÕES DE GARRAS MANIPULADORAS DENTRO DO PROBLEMA DE EMPACOTAMENTO DE PALETES DO PRODUTOR – UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA.

João Pedro Woitchy Barbosa

1101765

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação de António José Galvão Ramos e coorientada por Fábio Branco, professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



## JÚRI

### **Presidente**

Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

### **Orientador**

Professor Doutor António José Galvão Ramos  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

### **Coorientador**

Professor Doutor Fábio José Ceron Branco  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

### **Arguente**

Professor Doutor Ana Maria Pinto de Moura  
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro



## AGRADECIMENTOS

Para todos aqueles que me fortalecem. Para todos aqueles que me trouxeram aqui.

Para você que é a mulher da minha vida, que me ensinou a ser quem sou. Me ensinou o que é ser forte, me mostrou como é que se faz para vencer na vida.

Para você que além do nome, me deu o coração. Que quando estive tão presente quanto queria me mostrou na vida uma beleza que eu não via.

Para vocês que são meus protetores e além de terem cuidado da guarda, sempre foram além e me mostraram onde é que fica o Norte.

Para vocês que não são de sangue, mas são os pais dos meus irmãos. Que deram tanto de si por nós que mostraram que a paternidade vem de dentro do peito.

Para vocês quatro, os senhores dos meus pais, que me mostraram as virtudes. Me ensinaram sobre respeito, compaixão, paciência e perdão.

Para você que sempre estive comigo, lado a lado. Que mostrou o que é ser um homem, sendo a mulher mais extraordinária do mundo.

Para você que sempre provou que eu estava errado, mesmo quando não estava. Que muitas vezes estive longe, mas sempre foi e sempre será o maior de todos.

Para vocês dois que mesmo sem ter ciência e sem fazer esforço para isso, são parte fundamental da minha garra.

Para vocês dois que me aguentam todos os dias. Faça chuva, faça sol, todos os três juntos ou cada um no seu cantinho, estão lá me empurrando mais um degrau acima.

Para todos vocês que tenho a honra de chamar de amigos, que me mostraram que a família que a gente quer por perto é bem maior do que a linhagem pode mostrar.

Para todos vocês que tenho o orgulho de dizer que amo, muito obrigado.





## **PALAVRAS CHAVE**

Problema de Empacotamento de Paletes do Produtor, Manipuladores Robóticos, Garras Manipuladoras, Heurísticas Aplicadas.

## **RESUMO**

Neste trabalho discutiu-se e estudou-se o Problema de Empacotamento de Paletes do Produtor, com o objetivo da análise e inclusão de restrições ligadas ao manipulador robótico que realiza o carregamento dos itens como parte da caracterização do problema. Também se avançou no campo computacional, propondo uma solução heurística para determinar o número de movimentos e a distância percorrida pelo manipulador no âmbito do conhecido problema.

Analisou-se o método de resolução proposto e avaliou-se os resultados quanto à sua confiabilidade dentro do escopo proposto. Criou-se uma interface de apoio ao utilizador aliado às heurísticas para facilitar a aplicação da heurística a diversos problemas. Além disso, foi realizada uma breve avaliação da eficiência dos tempos computacionais obtidos.

Obteve-se resultados de tempos computacionais satisfatórios para todos os cenários testados, aliados a resultados confiáveis de número de movimentos e distância percorrida pelo manipulador. Com a observação dos resultados em várias combinações de parâmetros de manipuladores, percebeu-se que duas soluções do problema com mesmo tamanho de caixas e tamanho de paleta, podem apresentar resultados distintos quanto a distância percorrida do manipulador e resultar numa melhor solução quando o manipulador é levado em consideração.



**KEYWORDS**

*Manufacturer's Pallet Loading Problem, Box Robotics Grippers, Robotics Grippers, Applied Heuristics.*

**ABSTRACT**

*In the present paper, the manufacturer's pallet loading problem is discussed with the main goal of including restrictions related with the gripper that loads the items. An advance in the computational field of this problem was also made, while proposing heuristics for the known problem, increasing this considerations and features about the grippers.*

*The proposed solution method was analysed, and the results were evaluated based on the reliability in the proposed scope. A decision support system was developed allied to the heuristics to help its application. Also, a brief analysis about the computational time efficiency was also made.*

*Satisfactory computational times were obtained for all the scenarios tested, allied with reliable results in the distance travelled by the gripper and the number of movements realized to load the full pallet. Observing the results obtained in various combinations of grippers parameters, it has become clear that solutions of the palletization problem with the same number of boxes and same size of the pallet are able to present distinct results of a better pallet when the gripper is analysed.*



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

Abreviatura	Designação
PCP	Problema de Carregamento de Paletes
PCPP	Problema de Carregamento de Paletes do Produtor
PCPD	Problema de Carregamento de Paletes do Distribuidor

### Lista de Símbolos

Símbolo	Designação
$L$	Comprimento da Paleta
$W$	Largura da Paleta
$H$	Altura da Paleta
$l$	Comprimento da caixa
$w$	Largura da caixa
$h$	Altura da caixa
$\Delta$	Variação de uma característica



## GLOSSÁRIO DE TERMOS

Termo	Designação
Grupo Orientado	Grupo de caixas que possuem apenas uma orientação entre si.
Padrão de Paletização	Grupo de coordenadas que representa a disposição de caixa sobre um palete. Carregamento de um palete na forma de coordenadas.
Heurística	Sequência de ações a serem tomadas em recursão para que se atinja um resultado desejado.
Algoritmo	Sequência de instruções a serem seguidas rigorosamente para um determinado fim.
Interface de Apoio ao Utilizador	Interface em C# que torna ao utilizador a manipulação das variáveis e das restrições mais intuitiva e menos cansativa.
Manipulador	Equipamento robotizado utilizado para realizar a manipulação e carregamento das caixas sobre um palete.
Garra Manipuladora	Parte do manipulador que segura as caixas que são carregadas efetivamente.





# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: EXEMPLIFICAÇÃO DO PROBLEMA DE CORTE E EMPACOTAMENTO (FACCIO, 2008). .....	7
FIGURA 2: EXEMPLO DE PROBLEMA BIDIMENSIONAL. (ANDREAS FRITSCH, 1994). .....	11
FIGURA 3: EXEMPLO DE PROBLEMA TRIDIMENSIONAL. (SCHEITHAUER, 2018). .....	12
FIGURA 4: EXEMPLOS DE TIPOS DE PCP (A) PRODUTOR - PCPP E (B) DISTRIBUIDOR – PCPD (RIBEIRO & LORENA, 2007). .....	15
FIGURA 5: PERFORMANCE ARITMÉTICA EM <i>MS</i> (CHEN, 2010) .....	27
FIGURA 6: PERFORMANCE TRIGONOMÉTRICA EM <i>MS</i> (CHEN, 2010) .....	27
FIGURA 7: EXEMPLO DE FORMATO DE ARQUIVO DE LEITURA. ....	29
FIGURA 8: A) CAIXA COM ORIENTAÇÃO HORIZONTAL; B) CAIXA COM ORIENTAÇÃO VERTICAL .....	31
FIGURA 9: ALGORITMO ORIENTAÇÃO DA CAIXA.....	32
FIGURA 10: A) EXEMPLO DE PADRÃO DE PALETE SIMPLES COM CAIXAS NA HORIZONTAL. B) EXEMPLO DE PADRÃO DE PALETE SIMPLES COM CAIXAS NA VERTICAL. ....	33
FIGURA 11: EXEMPLO DE PADRÃO DE PALETE DUPLO.....	33
FIGURA 12: EXEMPLOS DE PADRÕES DE PALETES QUÁDRUPLOS .....	34
FIGURA 13: DEMONSTRAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE AUXÍLIO À CLASSIFICAÇÃO DA PALETE .....	35
FIGURA 14: ALGORITMO CLASSIFICAÇÃO DE PALETE .....	36
FIGURA 15: EXEMPLO DE PALETE COM CINCO GRUPOS. ....	37
FIGURA 16: TELA DO PROGRAMA LOGO APÓS A ABERTURA DO ARQUIVO DA PALETE. ....	44
FIGURA 17: INFORMAÇÕES CAIXA E PALETE. ....	44
FIGURA 18: INFORMAÇÕES E RESULTADOS DOS MANIPULADORES.....	45
FIGURA 19: FORMULÁRIO DE <i>INPUTS</i> DOS MANIPULADORES.....	46
FIGURA 20: LISTA DE CÁLCULOS.....	47
FIGURA 21: TEMPOS DE PROCESSAMENTO E DISPERSÃO DE VALORES.....	59

---

FIGURA 22: EVOLUÇÃO DOS TEMPOS DE PROCESSAMENTO EM FUNÇÃO DA COMPLEXIDADE DO PROBLEMA PROPOSTO .....	59
--	----

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: MANIPULADORES E SEUS MÉTODOS DE FUNCIONAMENTO .....	18
TABELA 2: PADRÕES DE CARREGAMENTO UTILIZADOS NOS TESTES .....	52
TABELA 3: Nº DE CAIXAS MÁXIMAS RESTRINGIDAS PELO PESO EM CADA MANIPULADOR EM CADA TESTE .....	53
TABELA 4: RESULTADOS OBTIDOS PARA VALIDAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO CAIXAS CARREGADAS PELO MANIPULADOR NO PROBLEMA 1. ....	55
TABELA 5: EXPOSIÇÃO DOS RESULTADOS MANUAIS E OBTIDOS PELO SOFTWARE .....	56
TABELA 6: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE CENÁRIOS .....	57
TABELA 7: PROBLEMAS SELECIONADOS PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA COMPLEXIDADE NOS TEMPOS DE CÁLCULO DO PROGRAMA. ....	58
TABELA 8: TEMPOS COMPUTACIONAIS EM MS E SUAS VARIAÇÕES EM FUNÇÃO DAS RESTRIÇÕES IMPOSTAS .....	60



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	ENQUADRAMENTO .....	1
1.2	OBJETIVO GERAL .....	2
1.3	ESTRUTURA DO RELATÓRIO .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
2.1	PROBLEMA DE CORTE E EMPACOTAMENTO.....	7
2.2	PROBLEMA DE EMPACOTAMENTO DE PALETES .....	14
2.3	Manipuladores .....	18
2.4	Enquadramento da Tese .....	20
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>23</b>
3.1	PARAMETRIZAÇÃO DOS MANIPULADORES.....	23
3.2	PARAMETRIZAÇÃO DO PADRÃO DE PALETIZAÇÃO .....	24
3.3	DEFINIÇÃO DE UMA LINGUAGEM DE CÓDIGO.....	27
3.4	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE.....	28
<b>4</b>	<b>VALIDAÇÕES DE RESULTADOS E ANÁLISE DOS TEMPOS COMPUTACIONAIS .....</b>	<b>51</b>
4.1	PADRÕES PARA VALIDAÇÃO DE RESULTADOS .....	51
4.2	MANIPULADORES.....	52
4.3	OTIMIZAÇÃO DO ESPAÇO INTERNO DO MANIPULADOR COM A ADIÇÃO DA RESTRIÇÃO DO PESO 53	
4.4	DISTÂNCIA PERCORRIDA PELO MANIPULADOR .....	53
4.5	RESULTADOS E TEMPOS DE PROCESSAMENTO.....	54
4.6	TEMPOS COMPUTACIONAIS DE CÁLCULO.....	57
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>65</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	65

---

5.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS .....	66
<b>BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO .....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXOS E APÊNDICES .....</b>	<b>73</b>
ANEXO A - Exemplos de Classificação de Dyckhoff .....	73
ANEXO B - Classificação de Problemas de Corte e Empacotamento por Wäscher et al (2007).....	74
APÊNDICE A – Padrões de Paletização e Suas Representações Gráficas .....	76
APÊNDICE B – Folha de Conferência dos Cálculos de Distância do Problema 13.....	91
APÊNDICE C – Tabelas de Resultados para Validação da Otimização do Espaço Interno do Manipulador .....	93
APÊNDICE D - Resultados de Tempos de processamento - complexidade.....	98
APÊNDICE E – Resultados de Tempos de Processamento – Demais Restrições .....	99
APÊNDICE F – Banco de Dados: Tempos de Processamento.....	106

# INTRODUÇÃO

## 1.1 ENQUADRAMENTO

## 1.2 OBJETIVO GERAL

## 1.3 ESTRUTURA DO RELATÓRIO





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 ENQUADRAMENTO

Vivemos em um mundo complexo, analógico. Entretanto a cada dia, mês, ano que passa, desenvolve-se mais e mais a capacidade humana de se transporem as características do mundo que nos cerca para o mundo computacional, digital, governado por linguagens resumidas a *zeros* e *uns*.

Graças a e em virtude dessa capacidade de traduzir situações reais em números, consegue-se, a cada avanço, solucionar novos tipos e graus de problemas. Tendo essa capacidade em mãos, desenvolvemos um ambiente onde situações que antes pareciam sem solução ou que nem sequer eram vistas como problemas, agora são frutos de estudo e otimizações.

Tomando como base essa nova realidade, buscou-se encontrar, dentro da Gestão Industrial, uma situação como as que foram descritas acima, e abrir novas portas para que se aprofundem os estudos e soluções através do uso dessas ferramentas incríveis que foram desenvolvidas desde a inserção da computação no meio científico e industrial. Nessa busca, identificou-se que um dos campos da Gestão Industrial mais estudados nas últimas décadas, ainda não tinha avançado para uma situação que já é realidade na indústria mundial.

O problema de empacotamento de paletes vem sendo estudado de diversas formas e abordagens nos últimos quase 60 anos. Entretanto, pouco se falou e discutiu sobre o acréscimo do método como o empacotamento é realizado, através de robôs paletizadores, ou garras manipuladoras. Essa característica apresenta-se como uma oportunidade de estudo e melhoria, sendo um ponto passível de otimização e melhoria dentro do setor de empacotamento e carregamento nas indústrias.

No presente trabalho tem-se como objetivos discutir o problema de empacotamento de paletes do produtor. Através da avaliação dos estudos feitos até o presente momento e do estado da arte do referido problema, busca-se encontrar uma heurística capaz de

acrescentar uma nova característica ao conhecido problema: a presença das garras manipuladoras como fator influenciador nos resultados de otimização do carregamento de paletes.

Tendo em vista essa situação atual da Indústria, tem-se como missão a apresentação da solução de padrões de paletização conhecidos e comumente utilizados, trazendo resultados a respeito da capacidade de os manipuladores efetuarem o carregamento da paleta. Busca-se analisar alguns padrões de paletização e abrir as portas para a determinação de quais as características físicas que possui o robô de paletização ideal para cada padrão estudado. Além dos resultados computacionais, busca-se a criação de uma interface de apoio ao utilizador na forma de aplicação, para que um usuário possa trabalhar de forma mais intuitiva com as heurísticas desenvolvidas.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Como objetivo geral do presente trabalho tem-se a criação de uma interface de apoio ao utilizador que, através da apresentação do padrão de carregamento de um paleta, e das características físicas de uma garra manipuladora, apresente resultados confiáveis quando se fala de distância percorrida pela garra manipuladora e número de movimentos feitos pela mesma para efetuar o carregamento do padrão de paletização apresentado.

Para os objetivos específicos, pretende-se discutir e revisar o Problema de Empacotamento de Paletes do Produtor, criar uma heurística que, através das coordenadas de um padrão de carregamento, resulte no número de movimentos e distância percorrida por uma determinada garra manipuladora ao carregar o fornecido padrão. Além dessa, pretende-se restringir o manipulador, além da sua capacidade dimensional, pela sua capacidade de levantamento de peso. Por fim, realizar uma análise frente aos tempos de processamento dos problemas.

### 1.3 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O presente relatório encontra-se dividido em Revisão Bibliográfica onde se revisa o Problema de Empacotamento de Paletes do Produtor; Desenvolvimento do Software, onde se discorre sobre as heurísticas desenvolvidas e se apresenta a Interface de apoio ao utilizador; Validação dos Resultados onde se analisa os resultados obtidos através do sistema e se realiza uma breve análise sobre os tempos de processamento dos resultados; e por fim a Conclusão do trabalho como um todo e apresentação de propostas de trabalhos futuros.



# **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

## **2.1 PROBLEMA DE CORTE E EMPACOTAMENTO**

## **2.2 PROBLEMA De EMPACOTAMENTO DE PALETES**

## **2.3 MANIPULADORES**

## **2.4 ENQUADRAMENTO DA TESE**



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROBLEMA DE CORTE E EMPACOTAMENTO

Desde meados dos anos 1960, dentro do ramo da investigação operacional, verificou-se a dificuldade e complexidade de diversos problemas industriais relacionados a aproveitamento de estoques. Essa classe de problemas é conhecida como Problema de Corte e Empacotamento.

Esse problema consiste em como dividir uma peça inteira em diversas peças menores, como uma barra, por exemplo, a ser maquinada. A otimização do corte consiste em tentar minimizar a quantidade de perdas de material.

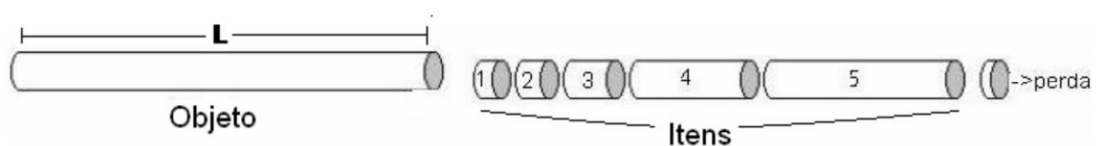


Figura 1: Exemplificação do problema de corte e empacotamento (Faccio, 2008).

O problema de corte e empacotamento começou a receber uma abordagem matemática pioneiramente pelos trabalhos de Gilmore & Gomory publicados inicialmente em 1961. O mesmo apresenta a complexidade que esses problemas podem atingir devido a atingirem elevadas quantidades de variáveis. A partir desta, discorrem uma abordagem matemática através da programação linear.

Desde então vem-se investigando cada vez mais essa classe de problemas devido à sua grande importância, gerada pela alta oportunidade de ganhos industriais com a otimização das suas soluções.



## 2.1.1 Classificações do Problema de Corte e Empacotamento

### 2.1.1.1 Classificação de Dyckhoff

Em seu artigo “*A typology of cutting and packing problems*” de 1990, Dyckhoff propõe uma classificação mais elaborada do problema a ser estudado. Evidencia a grande variedade de termos a serem utilizados por pesquisadores ao redor do mundo como uma questão a ser tratada, pois dificulta a pesquisa e a união do conhecimento gerado ao redor do mesmo assunto.

Com base numa sequência lógica de pensamento, seguindo a própria ideia do problema em si, ele cria uma classificação que se baseia, além da dimensão, em outros três critérios. Para critério, designou um símbolo para identificação do mesmo, a junção dos quatro símbolos gera uma identificação para a classificação do problema.

Os critérios e símbolos para classificação de Dyckhoff se elaboram da seguinte maneira:

- Dimensão:
  - (1) Unidimensional;
  - (2) Bidimensional;
  - (3) Tridimensional;
  - (N) N-dimensional.
- Tipo de Tarefa:
  - (B) Objetos inteiros e a seleção de pequenos itens;
  - (V) Pequenos itens e a seleção objetos inteiros.
- Classificação dos Grandes Objetos:
  - (O) Um objeto;
  - (I) Objetos Idênticos;
  - (D) Objetos Diferentes.
- Classificação dos Pequenos Itens:
  - (F) Poucos Itens;
  - (M) Muitos itens de muitas formas diferentes;
  - (R) Muitos itens de poucas formas diferentes;
  - (C) Itens Iguais entre si.

Antes de discorrer sobre as categorias de Dickhoff, é válido que se faça um esclarecimento. Quando o mesmo trata de grandes objetos e pequenos itens, se refere às parcelas de estudo aqui visadas. Os pequenos itens seriam os elementos que devem ser alocados dentro do espaço delimitado pelos grandes objetos. Por exemplo, no problema do carregamento de containers, as caixas seriam os pequenos itens enquanto o próprio container é o grande objeto. Já num problema de corte de chapas de uma estamparia, as peças a serem fabricadas são os pequenos itens, alocados dentro da chapa, grande objeto.

Regressando à classificação, quando Dickhoff mesmo se refere a tipos de tarefa, pretende separar os problemas quanto ao foco do estudo em si. Na categoria “B”, temos uma grande quantidade pequenos itens que devem ser alocados em um grande objeto. Nas palavras de Faccio (2008):

*“Neste caso, a quantidade de objetos existentes em estoque não é suficiente para atender todos os itens demandados e, com isto, alguns itens não são selecionados.” Faccio (2008)*

Na categoria “V”, o que encontramos é justamente o oposto. Possui-se uma grande quantidade de objetos e deve-se alocar os pequenos itens dentro destes. Novamente, podemos notar, aqui, que o foco dessa secção da classificação é separar quanto ao alvo do estudo, em outras palavras, quem é que se quer otimizar.

Agora partindo para a classificação dos grandes objetos, Dyckhoff nos apresenta 3 classes. A classe “O” se refere a situações que possuem apenas um único grande objeto. A classe “I” é destinada àqueles problemas em que se têm mais de um objeto, porém são idênticos entre si. Por último, a classe “D” aloca as situações também com mais de um objeto, mas, dessa vez, com vários tamanhos diferentes de objetos.

A última abordagem feita é a respeito dos pequenos itens, de maneira muito semelhante à para os grandes objetos. Divide-se os mesmos em: pequenas quantidades de itens, codificados pela letra “F”; grandes quantidades de itens e muitas variações de tamanhos, pela letra “M”; grandes quantidades de itens, mas com variações de

tamanhos restritas, pela letra “R”; e, por último, itens com tamanhos iguais, classe representada pela letra “C”.

Após devidamente classificada, a situação recebe uma “nomenclatura” baseada nos códigos que lhe foram designados. A nomenclatura se faz  $\alpha/\beta/\gamma/\delta$ , sendo “ $\alpha$ ” o número que representa a classificação quanto a dimensão, “ $\beta$ ” a letra indicando o tipo de tarefa, “ $\gamma$ ” a classificação quanto aos grandes objetos e  $\delta$  a mesma para os pequenos itens.

Dyckhoff elenca alguns problemas clássicos para exemplificar o método de classificação. A tabela completa encontra-se em anexo no presente escrito. Entre seus exemplos, se faz notável o próprio problema de corte e empacotamento clássico, que fica classificado como 1/V/I/R (Unidimensional; Pequenos itens e a seleção de objetos inteiros; Objetos Idênticos; Muitos itens de poucas formas) (Dyckhoff, 1990, p. 155)

#### *2.1.1.2 Classificação quanto à dimensão*

O problema de Corte e Empacotamento pode ser classificado quanto à dimensão em seis categorias como sugerido por Poldi, 2003. A sua divisão é feita em:

- Unidimensional;
- Bidimensional;
- Tridimensional;
- 1.5-dimensional;
- 2.5-dimensional;
- Multidimensional.

A primeira tríade de classes se faz óbvia, sendo elas uma crescente unitária de complexidade dimensional simples: uma, duas e três dimensões relevantes a serem consideradas. Barras de aço e rolos de papel a serem cortados em secções transversais são bons exemplos de problemas unidimensionais. Corte de chapas de aço, madeira ou placas de vidro, idem para problemas bidimensionais. Já para os tridimensionais, podemos observar o corte de blocos de espuma (Faccio, 2008).

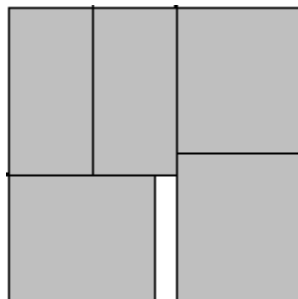


Figura 2: Exemplo de problema Bidimensional. (Andreas Fritsch, 1994).

Quando tratamos de problemas 1.5-dimensional e 2.5-dimensional estamos nos referindo a situações em que possuímos uma das dimensões variáveis. Os problemas 1.5 são, originalmente, bidimensionais, mas com uma dimensão variável. Por exemplo um rolo de tecido a ser cortado, onde sua largura é restrita, mas já o seu comprimento é variável o quanto desejarmos. O mesmo ocorre com os 2.5-dimensionais que são problemas tridimensionais, mas com uma de suas grandezas variável. Essa classe de problemas foi primariamente definida em 1978 por Haessler, tendo em vista que não se enquadravam adequadamente nas classes anteriormente tratadas. Viu-se a necessidade de criar uma nomenclatura nova para classificação dos mesmos.

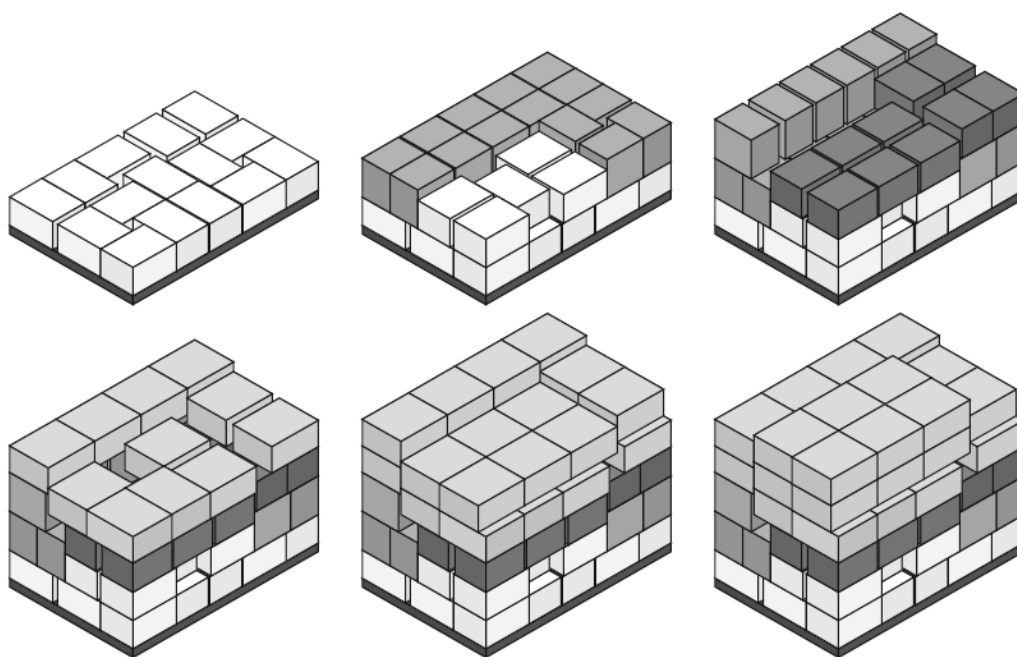


Figura 3: Exemplo de Problema Tridimensional. (Scheithauer, 2018).

Os problemas multidimensionais tratam-se de problemas com uma quarta ou maior dimensão envolvida, como por exemplo um problema tridimensional que possui uma grandeza temporal em sua composição. Como exemplo temos também um container, mas dessa vez o mesmo deve ser carregado por períodos de tempo sem interrupções como sugere Dyckhoff em 1990.

#### 2.1.1.3 Classificação de Wäscher

Mais recentemente, em 2007, Wäscher *et al.* revisaram a metodologia de classificação de Dyckhoff e a aprimoraram, inserindo mais três classes de problemas na tentativa de suprir algumas falhas que a classificação proposta anteriormente não cobria, como evidenciado no enunciado:

*“A aplicação da classificação de Dyckhoff não, necessariamente, resulta em categorias homogêneas de problemas.” (Wäscher, Haußner, & Schumann, 2007).<sup>1</sup>*

Wäscher *et al.* trabalha em cima da classificação de Dyckhoff e separa os problemas em três novas classes, sendo elas:

- Problemas Básicos

Gerado a partir da combinação dos critérios “tipos de tarefa” e “classificação de pequenos itens”. Os tipos de tarefa também são redefinidos, apenas para fim de melhorar a nomenclatura. São chamados, agora, de: Maximização da Saída, ao que antes vimos como “Objetos inteiros e a seleção de pequenos itens” e Minimização da entrada para o que era visto como “Pequenos itens e a seleção objetos inteiros”.

A classificação de pequenos itens também sofre alterações, sendo agora simplificada em três categorias, sendo elas: “Itens Idênticos”, “Itens fortemente heterogêneos” e “Itens pouco heterogêneos”. Com o cruzamento das categorias, tem-se toda a gama de situações inclusas na categoria de “Problemas Básicos”. No anexo B, encontra-se uma imagem oriunda do artigo de Wäscher *et al.* que nos auxilia no entendimento de como é feita essa classificação. Com esse método de classificação, chega-se a seis subcategorias:

- Maximização da saída:
  - Empacotamento de Itens Idênticos (Itens Idênticos);
  - Problema da alocação (Pouco Heterogêneos);
  - Problema da Mochila (Muito Heterogêneos).

---

<sup>1</sup> Tradução livre do autor: “Application of Dyckhoff’s typology does not necessarily result in homogeneous problem categories.” (Wäscher, Haußner, & Schumann, 2007)

- Minimização da entrada
  - Problema de Corte (Pouco Heterogêneos);
  - Problema do Empacotamento (Muito heterogêneos);
  - Problema de dimensão aberta (Dimensão Variável)

Quanto aos problemas de dimensão aberta cabe um maior esclarecimento. Os mesmos são análogos aos problemas 1.5-dimensional e 2.5-dimensional citados anteriormente. Por conta da presença de uma grandeza variável, a homogeneidade dos itens se torna arbitrária. As demais categorias apresentam todas as suas dimensões como grandezas fixas.

- Problemas Intermédios

Utilizando, agora, a classificação dos grandes objetos, chega-se a subclasse dos “Problemas Intermédios”, que reclassifica os “Problemas Básicos”. A exceção dos “Problemas de Empacotamento de Itens Idênticos” que não necessitam de uma classificação mais refinada devido ao seu grau de simplicidade.

Nenhuma terminologia nova é adicionada, nem subclasse criada nessa classificação. Apenas adiciona-se a característica referente à classificação do grande objeto ao problema analisado. Por exemplo, “problema de alocação de múltiplos grandes objetos idênticos”.

- Problemas Refinados

Como última classificação, adiciona-se o critério de dimensionalidade anteriormente descrito. Novamente, apenas adiciona o termo adequando ao problema em questão, sem criação de subclasses.

## 2.2 PROBLEMA DE EMPACOTAMENTO DE PALETES

Como vimos nas subsecções anteriores, o Problema de Corte e Empacotamento tem diversas classificações e cada uma delas recebe denominações diferentes. Isso ocorre

por ter-se encontrado uma classe de problemas que abrange vários problemas reais que acabaram por nomear essas subcategorias.

Diversos nomes foram dados a esses problemas conforme o tempo passou e estudos foram realizados. Dentre os mais conhecidos temos: *trim loss problem*, problema de carregamento de containers, problema da mochila, etc.

No presente texto, a subclasse a ser trabalhada será o Problema de Empacotamento de Paletes (PEP).

O Problema do Empacotamento de Paletes consiste em um problema característico de corte e empacotamento onde pretende-se dividir um paleta retangular em partes menores de maneira mais otimizada o possível, ou seja, com maior número de itens alocados sobre o mesmo. Divide-se o PEP em, basicamente, duas categorias. São elas, o Problema de Empacotamento de Paletes do Produtor (PEPP) e o Problema de Empacotamento de Paletes do Distribuidor (PEPD)(Bischoff & Ratcliff, 1995). Cada um se caracteriza pelo tipo de carga que se deve alocar nos paletes, sendo o PEPP característico por cargas idênticas e o PEPD por cargas diferentes entre si.

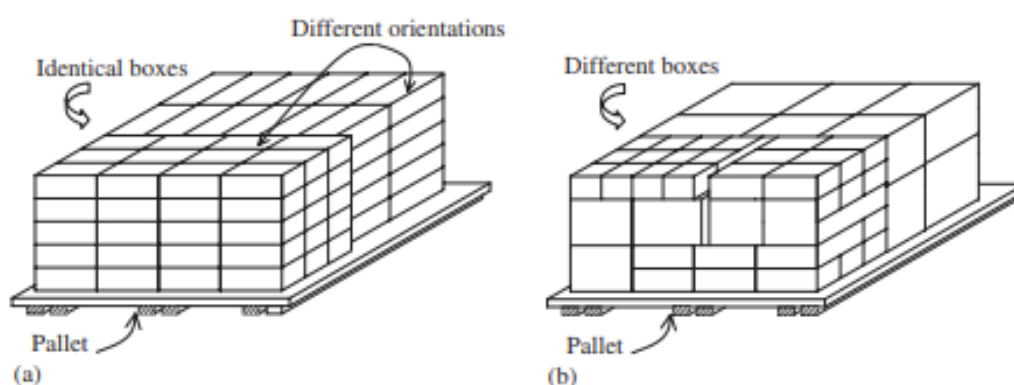


Figura 4: Exemplos de tipos de PCP (a) Produtor - PCPP e (b) Distribuidor – PCPD (Ribeiro & Lorena, 2007).

O PEPP vem sendo estudado vastamente desde a segunda metade da década de 60, tendo início com Barnett & Kynch em 1967 em seu artigo “*Exact Solution of a Simple Cutting Problem*”. A grande quantidade de esforço disposta em cima deste problema trouxe uma alta taxa de sucesso em suas soluções. Como evidenciado por Silva, Oliveira,



& Wäscher, 2016, quase todas as situações possíveis oriundas do PEPP foram solucionadas com aceitável tempo computacional, através de algoritmos exatos.

Esse sucesso, portanto, levou a exploração de problemas mais complexos como o PEPD, por exemplo. Este, como não possui restrição atribuída ao formato das caixas, nos apresenta dificuldade muito maior em encontrar soluções para si.

### 2.2.1 Problema de Empacotamento de Paletes do Produtor

Definimos o PEPP como um problema de corte e empacotamento um Problema de Empacotamento de Itens Idênticos dentro classificação de Wäscher *et al.*. Isso significa que possuímos aqui, um problema de maximização de saída de caráter básico.

Caracteriza-se, como um todo, o PEPP como um problema tridimensional. Caixas idênticas de tamanho  $l \cdot w \cdot h$  devem ser alocadas em um palete retangular  $L \cdot W$  de forma que o número de itens (caixas) alocados seja maximizado e todas as restrições sejam satisfeitas, ou seja, as caixas não se intersectam, não ultrapassam os limites de  $L \cdot W$  nem a altura máxima pré-definida. Outra restrição a ser considerada é a de que a base da caixa é sempre a mesma. Esta limitação nos dá a capacidade de reduzir o problema de um tri para um bidimensional (Scheithauer, 2018).

#### 2.2.1.1 Complexidade Computacional

Silva, *et al.* (2016) discute a definição do problema como um *NP-complete problem*, classificação anteriormente utilizada por muitos autores desde a década de 1980. Conclui que o estado da arte da definição da complexidade deste problema repousa ainda sobre a incerteza, como evidenciado por uma série de autores (Arslanov, 2000; Birgin *et al.*, 2005, 2010; Letchford and Amaral, 2001). Já Scheithauer (2018), classifica o problema como um *NP-hard*.

#### 2.2.1.2 Métodos de Solução

Scheithauer (2018) apresenta como solução para o PEPP um melhoramento da heurística G4, proposta pelo mesmo em seu artigo “The G4-Heuristic for the Pallet Loading Problem” (Scheithauer & Terno, 1996).

Silva *et al.* (2016) nos traz uma reunião e revisão de diversas soluções para o PEPP. Compara resultados computacionais obtidos em estudos feitos ao longo dos últimos anos na área (Wu and Ting (2007); Young-Gun and Maing-Kyu (2001); Martins and Dell (2008); Ribeiro and Lorena (2007); Birgin et al. (2005); Birgin et al. 2010)). Dentre as soluções analisadas encontram-se tanto métodos exatos como heurísticas.

Fica evidente no estudo que, para casos equivalentes, as heurísticas apresentam resultados, em geral, melhores.

*“Não inesperadamente, os tempos computacionais para algoritmos de heurísticas foram significativamente menores em relação ao algoritmo exato correspondente para a maioria dos 36 casos”<sup>2</sup>*

### 2.2.1.3 Campo de estudo

Após toda a análise, Silva et al. (2016) conclui o estudo respondendo à pergunta “Há ainda campo para pesquisa referente ao PEPP?” de maneira afirmativa, deixando claro que ainda há casos em que não há solução com tempo computacional aceitável, ou este apresenta possibilidade de ser melhorado.

Fica externo aos problemas resumidos também, o foco de estudo deste presente trabalho. Não há na literatura, problemas que expandam o PEPP para variáveis externas às suas 4 dimensões geométricas ( $L, W, l, w$ ).

Quando olhamos para o PEPP, avaliamos uma situação teórica de carregamento onde otimiza-se a quantidade de itens alocados sobre a paleta. Contudo, não se avalia o meio pelo qual estes itens passam para que possam ser dispostos daquela maneira proposta. Por ‘meio’, nos referimos às garras manipuladoras de cargas, as quais realizam a movimentação dos itens de maneira a posicioná-los das maneiras propostas pelas soluções do PEPP.

---

<sup>2</sup> Tradução livre do autor: “Not unexpectedly for heuristic algorithms, computing times were significantly shorter than for the corresponding exact algorithms for most of the 36 instances.” (Silva et al., 2016)

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

## 2.3 MANIPULADORES



Existem diversos tipos de manipuladores atualmente sendo utilizados em campo pelas indústrias. Alguns dos mais utilizados atualmente e, portanto, de maior interesse para estudo são:

### Tipos de Manipuladores

- Mandíbula
- Garfo
- Fricção
- Vácuo
- Com *add-on* para *interlayer*
- Com *add-on* para palete

Cada um destes tipos de manipuladores apresenta uma geometria diferente, assim como método de manipulação das cargas. Na Tabela 1 fica mais claro do que se está tratando.

Tabela 1: Manipuladores e seus métodos de funcionamento

Manipulador	Tipo	Descrição
	Mandíbula	As garras bilaterais pegam no grupo por baixo, por entre os rolos do tapete onde veio ou por entre as alhetas de uma mesa. Para além de por baixo, o grupo costuma ser apoiado por cima ou pelos lados. Ao abrir as garras para depositar o grupo, este dá uma ligeira queda.
	Garfo	O garfo unilateral pega no grupo por baixo, por entre os rolos do tapete de onde veio ou por entre as alhetas. Para além de por baixo, normalmente o grupo é apoiado por cima. Para pousar o grupo o mais normal é o garfo recuar, ficando o grupo parado por estar a ser empurrado contra uma chapa imóvel que o força a pousar na palete suavemente.

Manipulador	Tipo	Descrição
	Fricção	Chapas bilaterais descem e seguram o grupo por ambos os lados por fricção. A libertação do grupo dá-se por abertura das chapas e o seu posicionamento é feito de forma muito suave.
	Sucção	Utilizando sucção por vácuo seguram o grupo pela superfície superior e levantam-no.
	Com <i>add-on</i> para pegar em <i>interlayer</i>	Utilizando sucção por vácuo este <i>add-on</i> permite a garras que não funcionam por vácuo pegar e colocar <i>interlayers</i> .
	Com <i>add-on</i> para pegar em palete	Este <i>add-on</i> permite que garras sem capacidade para segurar um grupo de tão grandes dimensões (ex. fricção) ou sem capacidade de carga ou que por outros motivos possa ter dificuldades, possa agarrar na palete (ex. sucção).

Tabela 1 (Continuação): Manipuladores e seus métodos de funcionamento

## 2.4 ENQUADRAMENTO DA TESE

Nas subseções anteriores fez-se a revisão do que se foi estudado a respeito do PEPP. Percebe-se que o foco dos estudos até aqui foi a alocação dos itens sobre a paleta, num âmbito geométrico. Não há, portanto, estudo que extrapole essa área e nos leve a uma abordagem mais operacional do problema. Por operacional entende-se a maneira como será feita a alocação dos itens sobre a paleta.

Quando se passa a olhar para o problema desta maneira, deve-se considerar o meio de manipulação dos itens. De que maneira é que os manipuladores podem afetar o carregamento da paleta?

Com essa mentalidade mais operacional, elabora-se mais questões a respeito do PEPP. Quanto tempo leva, com este tipo de manipulador, para realizar o carregamento proposto pela solução dada?

O presente trabalho vem, justamente, tentar fornecer uma abordagem para essas questões. Através da análise dos manipuladores, seus métodos de carregamento e geometrias, busca-se encontrar soluções mais realistas para as situações encontradas dentro da indústria.

# DESENVOLVIMENTO

3.1 PARAMETRIZAÇÃO DOS MANIPULADORES

3.2 PARAMETRIZAÇÃO DO PADRÃO DE PALETIZAÇÃO

3.3 DEFINIÇÃO DE UMA LINGUAGEM DE CÓDIGO

3.4 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE



### 3 DESENVOLVIMENTO

O objetivo do desenvolvimento do sistema de suporte à decisão é que se consiga avaliar qual dos tipos de manipuladores tem um desempenho maior em carregar um padrão de carregamento da paleta. Para isso, começamos o desenvolvimento criando parâmetros de análise para que possamos trabalhar as características, tanto dos manipuladores quanto do padrão a ser analisado.

#### 3.1 PARAMETRIZAÇÃO DOS MANIPULADORES

Programas de carregamento de paletes já existem. O início do desenvolvimento deste trabalho partiu da identificação dos aspetos e características relevantes nos manipuladores, para que se possa gerar a parametrização dos mesmos e realizar a avaliação computacional.

Para identificação destes pontos, realizou-se uma análise do processo de carregamento de cada um dos tipos de manipuladores a serem trabalhados. Por sua vez foram identificadas características em comum entre eles, mas também cada um apresentou um grupo de características distintas entre si.

Ao avaliar os métodos de carregamento, percebe-se que as principais características comuns entre todos os tipos de manipuladores são duas:

- a) Área útil de carregamento: Isto nada mais é do que a área que o manipulador consegue utilizar para carregamento, o que no fim se traduz na quantidade de caixas que se consegue manipular, carregar em um movimento. Essa área pode ser definida por:

$$M(L_m, W_m) := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : 0 \leq x < L_m, 0 \leq y < W_m\}$$

Onde  $L_m$  e  $W_m$  são as dimensões em comprimento e largura da área útil de carregamento do manipulador.



- b) Capacidade de rotação: Isto é a capacidade que o manipulador tem ou não de rotacionar o grupo de caixas a ser manipulado. Isto se demonstra importante a partir do momento que a configuração da paleta pode ser restringida se o manipulador não puder alterar a orientação do grupo de caixas. Essa variável se trata de uma variável binária assumindo os valores de verdadeira e falsa.

Continuando a avaliação, identificou-se também que, entre os tipos principais de manipuladores (mandíbula, garfo, fricção e sucção) existem duas características que aparecem, mas não em todos os quatro. Elas são:

- c) Espaço para liberação: Esta característica é presente nos dois manipuladores que utilizam de garfos (mandíbula e garfo unilateral), e também no manipulador por fricção. Ela diz respeito à distância horizontal que o manipulador precisa para liberar o grupo de caixas que se está carregando naquele movimento sobre a paleta. Isto se reflete na necessidade de uma área livre em uma direção no momento de soltura das caixas. Esta por sua vez necessita ser alocada em duas variáveis ( $T_1$  e  $T_2$ ), sendo que  $T_2$  assume o valor nulo no caso do garfo unilateral.
- d) Força de *grip*: Esta característica é exclusiva dos manipuladores de fricção e de sucção. Ela diz respeito à força que os manipuladores conseguem aplicar para suspender o grupo de carregamento ao ar. Isto se traduz, por final, em um peso máximo de grupo que se consegue carregar por movimento de carregamento. Essa característica se traduz aqui como a variável  $P$ .

## 3.2 PARAMETRIZAÇÃO DO PADRÃO DE PALETIZAÇÃO

Para realizar a comparação entre o desempenho dos tipos de manipuladores, deve-se trabalhar com o padrão de maneira a dividi-lo em grupos de carregamento, os quais serão os responsáveis pelo número de movimentos que os manipuladores terão de fazer para concluir o carregamento.

### 3.2.1 Posicionamento dos Itens

A primeira coisa que se deve fazer com o padrão, é identificá-lo propriamente. O padrão deve ser inserido e tratado como um conjunto de coordenadas, sendo cada par de

coordenadas  $(x_k, y_k)$  as coordenadas relativas ao ponto extremo inferior esquerdo de cada item  $k$ . O ponto “O” (0,0) a ser considerado, portanto é o ponto extremo inferior esquerdo. Deve-se inserir também o tamanho de cada item  $k$  para que se faça o posicionamento adequado do padrão. O tamanho deve ser inserido na forma de duas coordenadas  $(l, w)$ . Deve-se notar que a orientação da caixa pode variar. Dessa forma, considera-se inicialmente, para fins de entrada,  $l > w$ .

Com isso em mente, o padrão de paletização deve ser inserido através das coordenadas de cada item. Sendo assim, cada item definido por apenas dois pontos: o ponto  $(x_k, y_k)$  e  $(x_k + l, y_k + w)$  ou  $(x_k + w, y_k + l)$  a depender da orientação da caixa.

Com esses valores, já se tem mapeado toda a configuração da paleta. A partir daí é que começam as operações e tratamentos de dados.

### 3.2.2 Padrão Guilhotinável

Para que se trabalhe sobre o padrão, a primeira coisa é classificar o padrão como um padrão guilhotinável ou não-guilhotinável. Um padrão de carregamento pode ser considerado guilhotinável quando todo o carregamento pode ser dividido em blocos de itens que podem ser extraídos por um corte de guilhotina. Por sua vez, um corte de guilhotina é caracterizado por ser um corte que secciona o padrão de uma extremidade a outra por completo em uma orientação.

Em outras palavras, o padrão guilhotinável é um padrão que pode ser subdividido em grupos de itens menores seguindo uma ordem de separação que inicia pelas extremidades do grupo, sempre o separando em fatias. Fatias essas que devem ser extraídas sempre de uma extremidade a outra do padrão como ele se apresenta no momento (Ben Messaoud, Chu, & Espinouse, 2008).

Deseja-se definir um grupo como guilhotinável ou não para que se trate já da complexidade do problema. Assim como tratar de problemas de geometria regular é mais simples do que problemas com geometria não-regular, tratar de problemas guilhotináveis é mais simples do que problemas não-guilhotináveis.

Para essa distinção, Messaoud, Chu & Espinouse criaram um algoritmo que distingue um padrão entre essas duas classes de padrões em seu artigo “Characterization and modelling of guillotine constraints”.

Esse algoritmo consiste em separar as coordenadas das caixas em duas matrizes. Uma para as coordenadas horizontais e outra para as verticais, sempre em ordem não-decrescente. A partir dessas matrizes comparam-se as coordenadas e as suas posições, e confirma-se ou não se há como fazer um corte de guilhotina naquele ponto.

Faz-se isso para as duas matrizes até que se acabem os grupos possíveis. Ao final se restar mais de uma caixa em uma matriz e não for mais possível realizar um corte de guilhotina, o padrão é classificado como não-guilhotinável.

### 3.2.3 Sequencia lógica de desenvolvimento do algoritmo

Aqui nesta subseção dá-se início ao desenvolvimento da lógica de pensamento do nosso código. Nos próximos parágrafos será discriminada a sequência de pensamento para que se obtivesse o algoritmo.

Temos como objetivo principal a escolha do melhor tipo de manipulador para carregar aquele padrão específico previamente fornecido. Como melhor manipulador, entende-se neste trabalho, que é aquele que faz o carregamento da paleta no menor tempo.

Como os tempos de cada máquina são resultados muito empíricos e não só dependentes do tipo de manipulador, utilizaremos aqui o número de movimentos que o manipulador realizará para carregar o padrão. Outra indicação que será feita, é a de distância percorrida pelo manipulador para carregamento total da paleta.

O resultado de número de movimentos realizados pelo manipulador será, ao fim da computação dos dados, a soma entre o número de grupos que o manipulador precisou contemplar para que se carregue a paleta todo e o número de rotações realizadas para o mesmo fim (caso o manipulador realize rotações).

### 3.3 DEFINIÇÃO DE UMA LINGUAGEM DE CÓDIGO

O software em desenvolvimento tem por característica computacional, cálculos aritméticos durante as definições dos grupos de carregamento e cálculos trigonométricos quando se efetuam os cálculos das distâncias percorridas nos movimentos de carregamentos.

Segundo o estudo feito por Chen (2010), numa realização de benchmarking entre linguagens de programação, o C#, comparado com C++ e C puro apresenta resultados tão bom quanto as duas citadas para cálculos aritméticos e muito melhores para os cálculos trigonométricos.

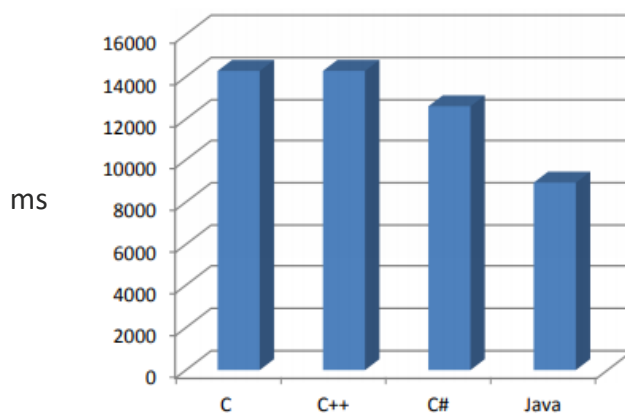


Figura 5: Performance aritmética em ms (Chen, 2010)

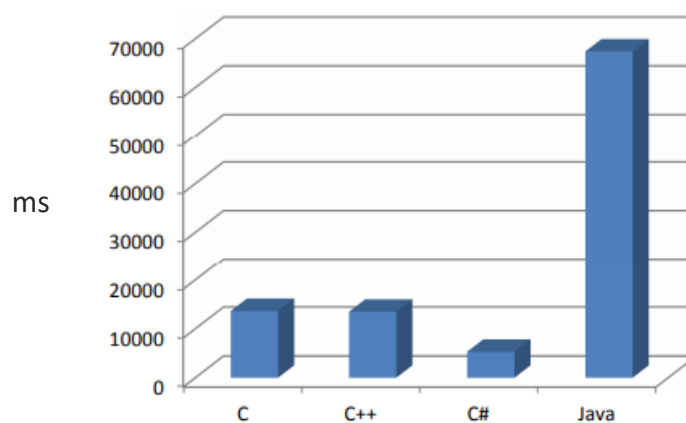


Figura 6: Performance trigonométrica em ms (Chen, 2010)

Para além disso, o C# é uma linguagem que traz facilidades como a da interface com utilizador ser facilmente trabalhável, e a facilidade em se encontrar erros, etc. O C# foi uma linguagem desenvolvida a partir da junção de C e C++, portanto, apresenta características positivas dessas duas linguagens.

Por conta dessas características, e da sua ligeira vantagem em computar dados simples e realizar interações trigonométricas, o C# se demonstra ideal para o desenvolvimento em questão.

### 3.4 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

Esta secção tem por objetivo descrever, em sequência, como foi feito o desenvolvimento das *features* do software. A sequência na qual se descreverá o desenvolvimento é definida mais para a compreensão do leitor do que à ordem de desenvolvimento propriamente dita. A sequência inicia-se pelas entradas de dados, passa pelos cálculos e heurísticas utilizados e depois para os resultados que se consegue obter

#### 3.4.1 Entrada de dados

A princípio, termos como base para trabalho, dois tipos de entradas: O padrão de carregamento da palete e o manipulador que fará o carregamento do mesmo.

##### 3.4.1.1 Padrão de Carregamento

Para que o software reconheça o padrão de carregamento da palete, optou-se por utilizar um arquivo *.txt*. Definiu-se um modelo de apresentação dos dados para que se consiga tratar os valores propriamente.

No arquivo principal, deve-se conter na primeira linha, as três coordenadas principais da palete: o tamanho em  $X$ , em  $Y$  e em  $Z$ , respectivamente. Nas linhas seguintes, as informações contidas são o par de coordenadas de cada caixa a ser carregada na palete e o peso respetivo de cada caixa. Essas coordenadas devem estar na ordem  $X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2$  e Peso da caixa. Todos os dados são separados por um *TAB*, e a mudança de linhas, com *ENTER*.

A partir desta caracterização, consegue-se obter diretamente o posicionamento de cada caixa, o tamanho da paleta e o peso das caixas.

A screenshot of a Notepad window titled "1100x400.txt - Notepad". The window has a menu bar with "File", "Edit", "Format", "View", and "Help". The text content is a table with 7 columns and 20 rows. The first row contains the values "1100", "400", "600". The following 19 rows contain pairs of (x, y) coordinates, followed by two more values, and a final value. The data is as follows:

1100	400	600				
0	0	0	210	70	100	3
0	0	100	210	70	200	3
0	0	200	210	70	300	3
0	0	300	210	70	400	3
0	0	400	210	70	500	3
0	0	500	210	70	600	3
0	70	0	210	140	100	3
0	70	100	210	140	200	3
0	70	200	210	140	300	3
0	70	300	210	140	400	3
0	70	400	210	140	500	3
0	70	500	210	140	600	3
0	140	0	210	210	100	3
0	140	100	210	210	200	3
0	140	200	210	210	300	3
0	140	300	210	210	400	3
0	140	400	210	210	500	3
0	140	500	210	210	600	3

Figura 7: Exemplo de formato de arquivo de leitura.

Esse arquivo de entrada deve ser formado baseado no posicionamento das caixas conforme o padrão que será testado. O método de obtenção do arquivo nesse formato não é objeto de estudo do presente trabalho. Apenas utiliza-se o arquivo como entrada de dados.

#### 3.4.1.2 Caracterização do Manipulador

A outra entrada de dados diz respeito ao manipulador que fará o carregamento dessas caixas. Para essa caracterização, primeiro tem-se o tipo de manipulador que se utilizará. Em princípio considerou-se dois tipos de manipuladores: os de garras, que não tem a restrição de peso, e os por fricção ou vácuo que apresentam a restrição por peso. As outras características que foram levadas como entrada de dados em relação aos manipuladores e que são comuns aos dois tipos são: Dimensões (coordenadas  $x$  e  $y$ ) e a capacidade ou não de rotacionar em seu próprio eixo  $z$ .

### 3.4.2 Cálculos e Heurísticas

Após fornecido o padrão de carregamento (arquivo .txt com as coordenadas das caixas e da palete), alguns cálculos simples já são efetuados. Com base neles, extraímos algumas informações úteis.

#### 3.4.2.1 Tamanho da Caixa

O primeiro cálculo que se efetua é a identificação do tamanho da caixa. Este é feito a partir da subtração das coordenadas  $X_2$  e  $X_1$  para o comprimento ' $x$ ' da caixa,  $Y_2$  e  $Y_1$  para a largura ' $y$ ' da caixa e  $Z_2$  e  $Z_1$  para a altura ' $z$ ' da caixa. Estes cálculos são feitos todos na primeira caixa do carregamento.

Faz-se necessário o cálculo pela eventualidade da primeira caixa não estar posicionada exatamente na origem da paleta.

Também se verifica se o  $\Delta x$  ou o  $\Delta y$  é maior. Escolhe-se o maior deles e caracteriza-se como comprimento. O menor, por sua vez, é a largura. Essa escolha é realizada apenas para padronização das dimensões e facilidade na verificação e identificação do padrão, já que sempre o lado maior da caixa será considerado o seu comprimento e nos auxilia futuramente na definição da orientação de cada caixa.

#### 3.4.2.2 Número de Níveis e Nível de Cada Caixa

Em seguida, faz-se o cálculo da quantidade de níveis que compõe a paleta. Como a premissa do problema é o Problema de Paletização do Produtor, sabe-se que todas as caixas possuem o mesmo tamanho. Assim, a obtenção do número de níveis se faz juntamente com a determinação do nível em que cada caixa se encontra. Percorre-se as caixas e divide-se o valor do  $Z_2$  da cada caixa com a altura das caixas. Isto resulta diretamente no nível ao qual aquela caixa pertence. Em sequência, analisa-se todos os valores de nível das caixas. O maior deles é exatamente o número de níveis da paleta.

#### 3.4.2.3 Verificação de orientação de cada caixa

Como parte do estudo é analisar diferentes padrões de carregamento de paleta, fez-se necessário uma verificação da orientação das caixas quando pousadas na paleta. Para fins de melhor diálogo, definiu-se que as caixas possuem orientação horizontal quando

a sua coordenada  $x$  é maior que a coordenada  $y$ , e que elas possuem orientação vertical quando possuem a coordenada  $y$  maior que a coordenada  $x$ .

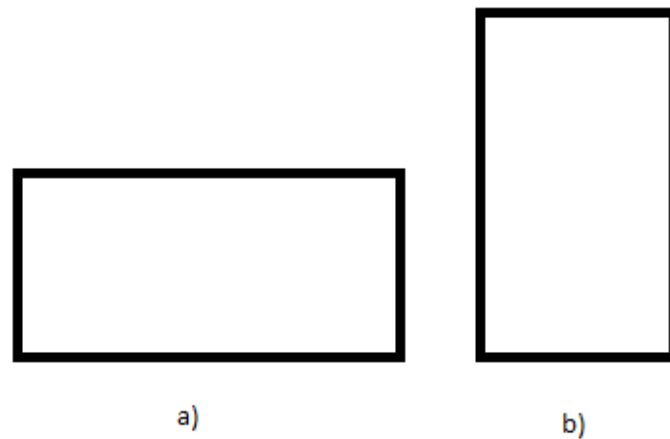


Figura 8: a) Caixa com orientação Horizontal; b) Caixa com orientação Vertical

Essa definição se faz de maneira simples. Temos definido que o comprimento da caixa é o maior entre os lados da caixa. Tendo isso em vista, ao ler as coordenadas da caixa, compara-se o  $\Delta x$  de cada caixa com o comprimento das caixas definido anteriormente. Se o  $\Delta x$  for igual, a caixa fica definida como tendo orientação horizontal. Do contrário, a caixa possui orientação vertical (Figura 9).



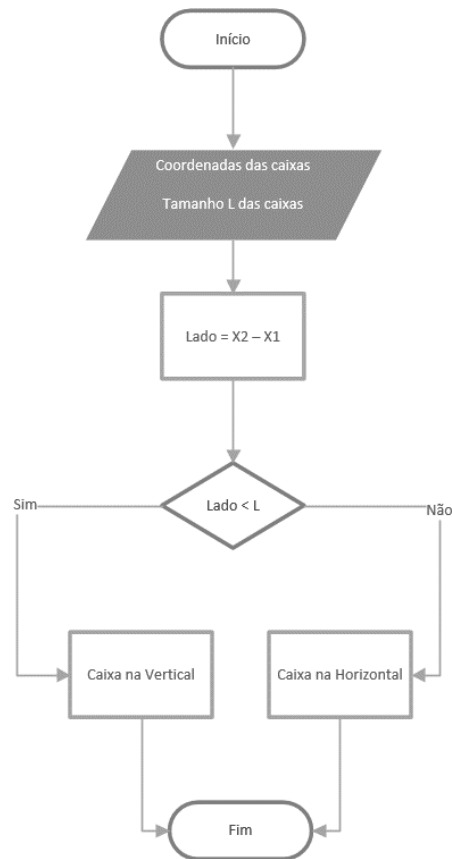


Figura 9: Algoritmo Orientação da caixa

Dessa maneira, encerram-se os cálculos que se faz somente com a leitura do arquivo de texto com as coordenadas.

#### 3.4.2.4 Caracterização do Tipo de Padrão da Paleta

Para que se possa ser feito a solução dos paletes, subdividiu-se os padrões em três graus de complexidade para o presente trabalho. Estas divisões são feitas com base na existência de grupos de caixas que possuem a mesma orientação dentro da paleta.

As três divisões que se criou foram:

- Paletes Simples (com apenas um grande grupo)
- Paletes Duplas (Dois grupos de orientação)
- Paletes Quádruplas (Quatro grupos de orientação)
- Paletes com 5 grupos

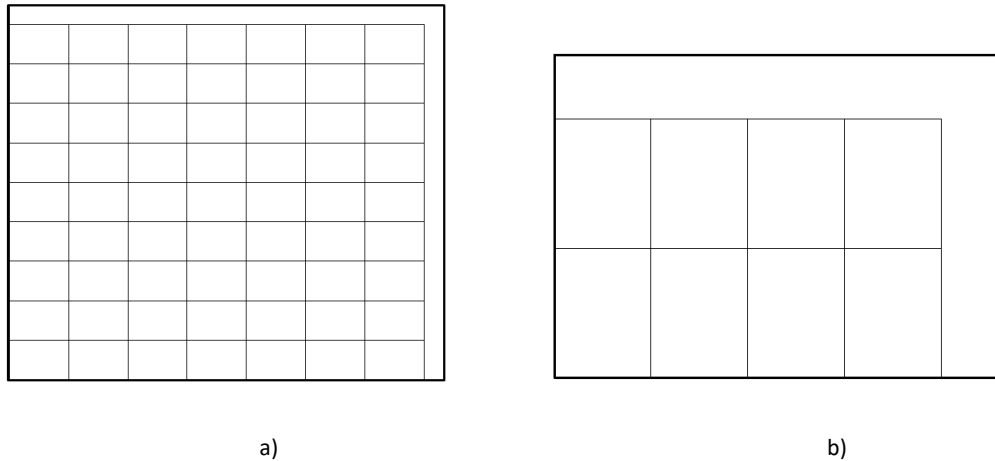


Figura 10: a) Exemplo de padrão de palete simples com caixas na horizontal.  
b) Exemplo de padrão de palete simples com caixas na vertical.

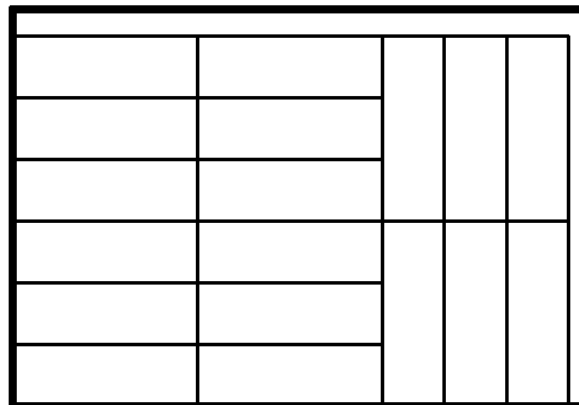


Figura 11: Exemplo de padrão de palete duplo

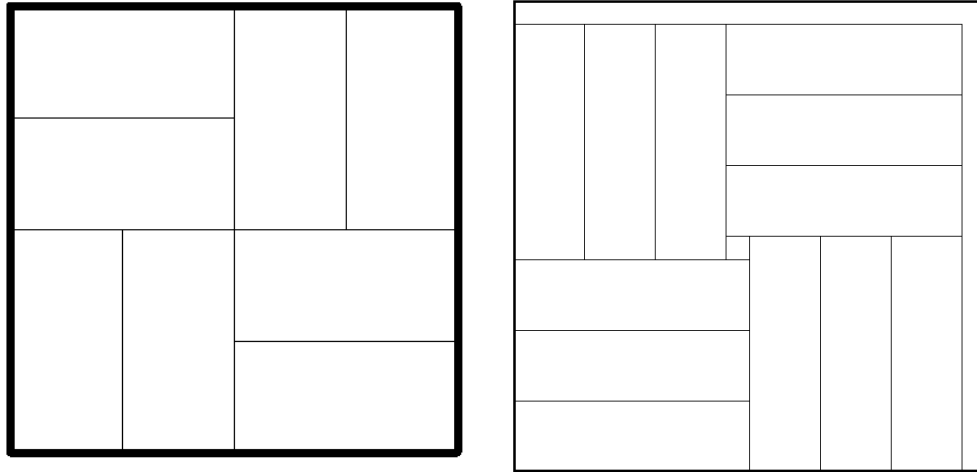


Figura 12: Exemplos de padrões de paletes quádruplos

Essas divisões se fizeram necessárias para que se pudesse tratar os grupos de caixas de maneira eficaz. No momento da leitura do arquivo o programa busca as coordenadas  $X$  e  $Y$  onde há mudanças de orientação, percorrendo as 4 linhas limitantes da paleta. Ou seja, percorre-se o perímetro das caixas e identifica em quais coordenadas desse perímetro faz-se a mudança de orientação. Com isso, consegue-se 4 pares de coordenadas, 2 coordenadas  $X$  e 2 coordenadas  $Y$  para cada face da paleta.

A essas variáveis deu-se o nome de  $X_{ij}$  e  $Y_{ij}$  onde  $i$  é a posição da variável na face  $j$ , sendo as faces esquerda e inferior representadas por  $j = 0$  e as faces superior e direita por  $j = 1$ . Sendo assim:

- $X_{00}$  e  $X_{10}$  para as coordenadas da face inferior;
- $X_{01}$  e  $X_{11}$  para as coordenadas da face superior;
- $Y_{00}$  e  $Y_{10}$  para as coordenadas da face esquerda;
- $Y_{10}$  e  $Y_{11}$  para as coordenadas da face direita;

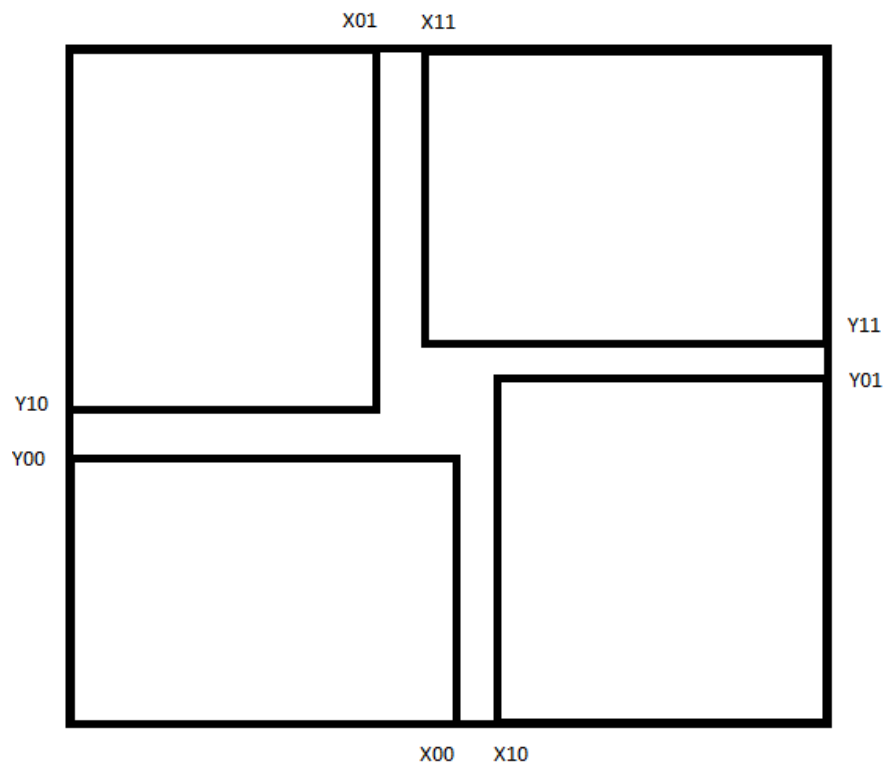


Figura 13: Demonstração das variáveis de auxílio à classificação da paleta

A partir da determinação dessas 4 coordenadas consegue-se dizer a qual grupo a paleta pertence. Essa verificação é feita a partir do seguinte algoritmo:

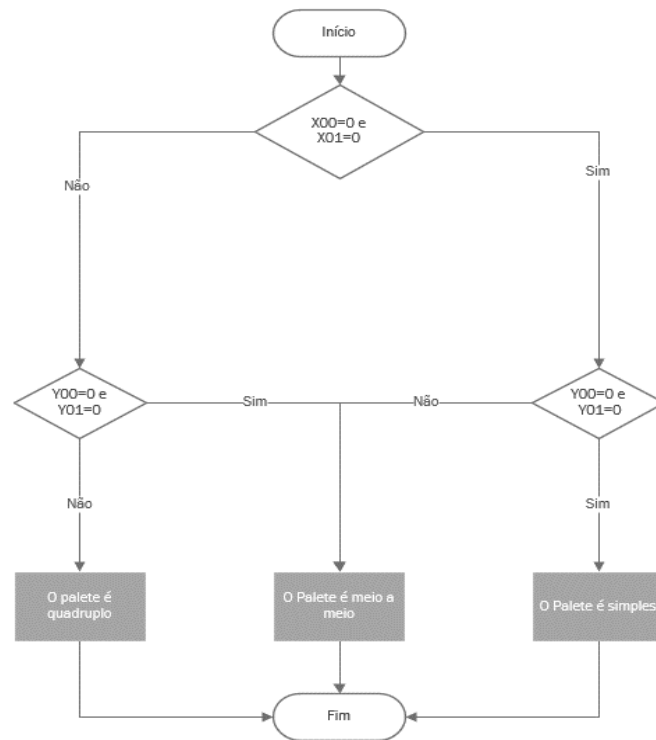


Figura 14: Algoritmo Classificação de Palete

Com essa determinação, ainda conseguimos tratar um tipo de palete adicional. Existem paletes divididos em 5 grupos de caixas. Essas paletes são organizadas de forma idêntica às paletes quadruplas, mas o espaço central entre os 4 grupos é o suficiente para a alocação de mais uma caixa ou mais um grupo de caixas.

Com essa caracterização, viu-se a necessidade de realizar uma verificação quanto ao tamanho do espaço central deixado e a existência ou não de caixas inseridas neste espaço. Se essa verificação for positiva, adiciona-se mais um quinto grupo à base de cálculos.

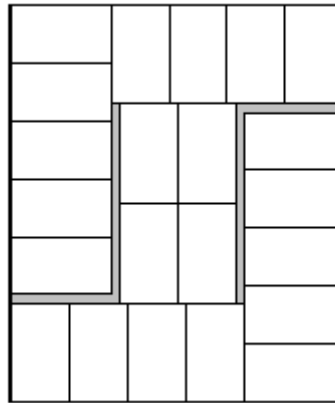


Figura 15: Exemplo de palete com cinco grupos.

#### 3.4.2.5 Heurísticas de Solução para o Padrão Simples

Em primeiro lugar, buscou-se definir uma maneira de descobrir em quantos movimentos o manipulador inserido conseguia fazer o carregamento de um palete simples (apenas um grupo orientado), pois, afinal de contas, todos os outros paletes se resumiriam a vários paletes simples, já que os dividimos por grupos orientados.

Por grupo orientado, entende-se um grupo de caixas adjacentes que possuem todas a mesma orientação, seja ela vertical ou horizontal.

Fez-se a presunção que os manipuladores serão capazes apenas de carregar grupos que tivessem a forma de retângulos regulares, ou seja, as linhas e colunas inseridas dentro do manipulador devem estar completas. O que implica em um grupo regular com linhas e colunas definidas dentro da área útil de carregamento do manipulador.

Para a solução da palete simples, ou grupo orientado o seguinte algoritmo é utilizado:

1. Identifica-se a orientação do grupo
2. Se:
  - a. **A ORIENTAÇÃO DAS CAIXAS FOR HORIZONTAL:**
    - i. Identifica-se o número de linhas do grupo através da divisão inteira do comprimento da caixa pelo tamanho  $X_{max}$  da palete.

- ii. Identifica-se o número de colunas do grupo através da divisão inteira da largura da caixa pelo tamanho  $Y_{max}$  da paleta.

**B. A ORIENTAÇÃO DAS CAIXAS FOR VERTICAL:**

- i. identifica-se o número de linhas do grupo através da divisão inteira da largura da caixa pelo tamanho  $X_{max}$  da paleta.
  - ii. Identifica-se o número de colunas do grupo através da divisão inteira do comprimento da caixa pelo tamanho  $Y_{max}$  da paleta.
3. Compara-se o tamanho da área útil de carregamento do manipulador com o tamanho das caixas
- a. Manipulador sem rotação:
    - i. Divide-se o comprimento da área útil de carregamento do manipulador pelo comprimento da caixa;
    - ii. Divide-se a largura da área útil de carregamento do manipulador pela largura da caixa;
    - iii. Multiplica-se os resultados de i e ii para obter o número de caixas total dentro do manipulador;
  - b. Se o manipulador realizar rotação em seu eixo z:
    - i. Manipulador com rotação:
      - > Divide-se o comprimento da área útil de carregamento do manipulador com a largura das caixas;
      - > Divide-se a largura da área útil de carregamento do manipulador com a largura das caixas;
      - > Multiplica-se os resultados de i e ii para o obter o número de caixas total dentro do manipulador com rotação;
  - c. Escolhe-se o maior resultado entre os manipuladores com e sem rotação.
4. Determina-se o número de movimentos que o manipulador levará para que se carreguem todas as linhas do grupo.

- a. Se a divisão entre o número de linhas do grupo e o número de caixas que o manipulador leva nas linhas não for um número inteiro, adiciona-se 1 movimento nas linhas;
5. Determina-se o número de movimentos que o manipulador levará para que se carreguem todas as colunas do grupo.
  - a. Se a divisão entre o número de colunas do grupo e o número de caixas que o manipulador leva nas colunas não for um número inteiro, adiciona-se 1 movimento nas colunas;
6. Multiplica-se os números de movimentos para carregamento das linhas e das colunas.

Este algoritmo apresenta resultados confiáveis para o número de movimentos que o manipulador precisará fazer para carregar o primeiro nível de um grupo simples, verificando se a rotação do manipulador é a melhor opção ou não.

#### *3.4.2.6 Adição da restrição de peso*

Quando se adiciona a restrição do peso máximo que o manipulador consegue suportar, como nos casos de manipuladores por fricção e manipuladores por sucção, encontra-se outra dificuldade. Além de reduzir o número de caixas que podem ser carregadas por movimento, encontramos a dificuldade de saber qual é o maior grupo estável (grupo que apresenta forma de um retângulo regular) que cabe dentro da área útil de carregamento do manipulador respeitando a condição do peso?

Para responder a essa questão uma outra heurística foi elaborada. Com o intuito de manter a estabilidade dos grupos contidos no manipulador e garantir que este grupo seja o maior possível dentre as possibilidades, faz-se o seguinte:

1. Verifica-se a quantidade de linhas e colunas máximas de caixas que podem ser carregadas pelo manipulador sem levar o peso em conta (grupo A)
2. Verifica-se a quantidade máxima de caixas que o manipulador pode carregar consoante ao peso máximo de carregamento (grupo B)
3. Se o número de caixas máximo restringido pelo peso for menor que o restringido pelo tamanho:



- a. Remove-se uma linha do grupo A;
- b. Calcula-se o tamanho total do grupo;
- c. Verifica-se se o tamanho do grupo A ainda é maior que B. Se:
  - i. **SIM:** repete-se a partir do passo “a” até que o número de linhas seja igual a 1;
  - ii. **NÃO:** armazena-se o valor das linhas e colunas do grupo A obtido na variável  $G_0$ . Pula para o passo “g”;
- d. Adiciona-se todas as linhas novamente;
- e. Remove-se uma coluna do grupo A;
- f. Repete-se de “a” até “e” até que o número de colunas seja 1;
- g. Reconstrói-se o grupo A;
- h. Remove-se uma coluna do grupo A;
- i. Calcula-se o tamanho total do grupo;
- j. Verifica-se se o tamanho do grupo A ainda é maior que B. Se:
  - i. **SIM:** repete-se a partir do passo “a” até que o número de colunas seja igual a 1;
  - ii. **NÃO:** armazena-se o valor das linhas e colunas do grupo A obtido na variável  $G_1$ . Pula para o passo “n”;
- k. Adiciona-se todas as colunas novamente;
- l. Remove-se uma linha do grupo A;
- m. Repete-se de “h” até “l” até que o número de linhas seja 1;
- n. Compara-se os resultados armazenados em “ $G_0$ .” e em “ $G_1$ ”;
  - i. Se “ $G_1$ ” > “ $G_0$ ”: linhas e colunas armazenadas em “c.ii” são o novo grupo carregado pelo manipulador.
  - ii. Se “ $G_1$ ” < “ $G_0$ ”: linhas e colunas armazenadas em “ $G_1$ ” são o novo grupo carregado pelo manipulador.

Essa heurística cria uma recursão onde primeiramente remove, linha a linha, todas as linhas mantendo o número de colunas fixas até chegarmos no maior grupo nessa ordem. Depois remove, coluna a coluna, todas as colunas mantendo fixo o número de linhas até chegarmos no maior grupo nessa ordem de remoção. Depois compara os dois resultados e opta pelo maior deles.

Um exemplo a heurística se prova necessária é um manipulador que possua capacidade dimensional para carregar 12 caixas, através de 3 linhas e 4 colunas, mas possua capacidade de carga de 10 caixas, um número que não pode ser atingido de maneira exata por nenhuma combinação de linhas e colunas desse manipulador.

Nesse caso, se fizermos apenas a regressão de linhas, obteremos como resultado um grupo com 2 linhas e 4 colunas, que leva 8 caixas. Mas se fizermos a regressão iniciada pelas colunas, o resultado é 3 linhas e 3 colunas, totalizando 9 caixas. Um resultado melhor do ponto de vista de quantidade de caixas carregadas que o primeiro.

#### *3.4.2.7 Cálculo da Distância percorrida*

A distância percorrida pelo manipulador no presente trabalho é um resultado obtido baseado nos grupos que foram selecionados previamente para o carregamento. Tem-se como base que o manipulador inicia todos os seus movimentos da coordenada (0,0,0) e vai até o centro do primeiro grupo de caixas a ser carregado. Considerou-se a distância lateral percorrida pelo manipulador e as distâncias verticais para que se eleve as caixas nos níveis superiores.

Os cálculos de distância são feitos dentro de cada grupo orientado. Ou seja, na paleta duplo, o algoritmo será executado uma vez para o grupo horizontal e uma vez para o grupo vertical. Para o caso da paleta quadruplo, por quatro vezes o algoritmo será executado, uma para cada um dos grupos orientados. Para o cálculo, baseou-se no tamanho dos grupos de caixas que serão carregados em cada movimento pelo manipulador.

O algoritmo trabalha da seguinte forma:

1. Realiza-se a identificação dos pontos  $X$  e  $Y$  iniciais do grupo orientado que se está a trabalhar. Chamamos esse par de coordenadas de  $Xg_0$  e  $Yg_0$ .
2. Através do resultado obtido no máximo de caixas que o manipulador consegue carregar, cria-se o tamanho do grupo a ser carregado em  $X$  e em  $Y$ . A essas quantidades, damos o nome de  $T_x$  e  $T_y$ .
3. Identifica-se o ponto no espaço onde se inicia o movimento do manipulador. A esse ponto atribui-se um par de coordenadas  $X_0$  e  $Y_0$

4. Inicia-se um ciclo de repetição para o cálculo propriamente dito:
  - a. Para os níveis  $N$  do grupo
    - i. A distância percorrida no nível é o produto do nível e de  $H$  da caixa
    - ii.  $Dz = N \cdot H$
    - iii. Para as colunas  $C$  do nível
      1. Para a Coluna atual a distância é:
 
$$Dx = (C \cdot Tx + (Tx/2) + Xg_0 + X_0$$
 Sendo  $C$  o número da coluna,  $Y_0$  o ponto  $Y$  de origem do manipulador;
      2. Para as linhas  $L$  da coluna
        - a.  $Dy = L \cdot Ty + (Ty/2) + Yg_0 + Y_0$   
Sendo  $L$  o número da linha,  $X_0$  o ponto  $X$  de origem do manipulador;
        - b.  $D = 2 \cdot \sqrt{Dx^2 + Dy^2} + 2 \cdot Dz$
5. Somam-se as distâncias  $D$  calculadas em todos os ciclos do Grupo
6. Parte para o próximo grupo orientado
7. Somam-se as distâncias de todos os grupos orientacionais

Com esse procedimento de cálculo, consegue-se obter os resultados das distâncias percorridas pelo manipulador para cada grupo a ser carregado. Posteriormente as distâncias para que se carregue um nível por completo.

Essa sub-rotina pode ser aplicada a todos as possibilidades de padrões de carregamento, já que seus cálculos são feitos após a divisão do padrão em grupos orientacionais.

Com esse algoritmo, finalizam-se os cálculos executados pelo programa.

### 3.4.2.8 *Ordem de verificações do Software*

O cálculo como um todo, por fim, divide-se em etapas:

1. Identificar as coordenadas perimetrais de mudança de orientação;

2. Identificar tipo de palete que está sendo trabalhado;
3. Dividir a paleta em seus grupos orientacionais baseado nas coordenadas perimetrais
4. Cálculo do maior grupo que pode ser carregado pelo manipulador
5. Verificação e otimização do grupo a ser carregado levando o peso em consideração
6. Cálculos de número de movimentos para cada grupo orientado e para os níveis
7. Cálculos das distâncias percorridas pelo manipulador.

Os resultados obtidos ao final do sequenciamento descrito acima são: o tamanho, em linhas e colunas, dos grupos que serão carregados pelo manipulador, o número de movimentos totais que o manipulador fará para carregar a paleta e a distância total percorrida pelo manipulador para que o mesmo faça o carregamento da paleta por completo.

### 3.4.3 Interface de Apoio ao Utilizador

Para além dos algoritmos, optou-se por criar uma aplicação para que o manuseio e trabalho, tanto dos dados de entrada, quanto da apresentação de resultados fosse feita de uma maneira mais *user friendly* quando comparada com a utilização do console padrão MS-DOS, ou os resultados apresentados apenas em um arquivo *.txt*.

#### 3.4.3.1 Layout da Aplicação

Na Figura 16, pode-se visualizar um *print* do ecrã do programa após a abertura do ficheiro de texto com as coordenadas da paleta no qual se vai trabalhar, e antes da inserção dos dados do manipulador que fará o carregamento da paleta.

São apresentadas ao utilizador, duas listas com as informações das caixas. Nestas listas de caixas, pode-se observar as informações todas de cada caixa individualmente. Na lista de “Caixas por tratar” elas encontram-se ordenadas da mesma maneira com que são lidas no arquivo de texto, apenas agora com a identificação devida das informações. Na listagem de “Caixas em tratamento” temos a mesma listagem, porém nesta, observamo-las separadas pelos níveis a que pertencem.

Figura 16: Tela do programa logo após a abertura do arquivo da paleta.

### 3.4.3.2 Informações das Caixas e da Paleta

Além das listas de caixas, assim que se inicializa um ficheiro com as informações da paleta, pode-se observar, à esquerda das listas, dois campos (Figura 17): um com informações a respeito das caixas que compõe a paleta (dimensões e peso individual de cada caixa). Logo abaixo desta observa-se o outro campo com as informações a respeito da própria paleta (dimensões, número de níveis, número de caixas totais e caixas por nível).

Figura 17: Informações caixa e paleta.

### 3.4.3.3 Características e Resultados dos Manipuladores

Na parte inferior do formulário principal temos 4 campos destinados a inserção das informações dos manipuladores (Figura 18). Optou-se por disponibilizar a inserção de até 4 manipuladores para serem testados em paralelo, por isso da existência de 4 campos.

Nestes campos, apresenta-se ao usuário às características definidas para o manipulador para que se realize o teste. Estas informações são inseridas através de um outro formulário explanado na próxima secção. Também nestes campos temos duas caixas numéricas que, após os cálculos, apresentam os resultados finais de número de movimentos realizados por aquele manipulador.

Desta maneira, torna-se de fácil visualização qual dos manipuladores apresentou resultados melhores para aquele padrão de carregamento fornecido.

Manipulador 1	Manipulador 2	Manipulador 3	Manipulador 4
Testar: <input checked="" type="checkbox"/>	Testar: <input checked="" type="checkbox"/>	Testar: <input type="checkbox"/>	Testar: <input type="checkbox"/>
Máx Caixa Peso: 2	Máx Caixa Peso: 2	Máx Caixa Peso: 1	Máx Caixa Peso: 1
Comprimento: 210	Comprimento: 210	Comprimento: 1	Comprimento: 1
Largura: 210	Largura: 210	Largura: 1	Largura: 1
Rotação: <input checked="" type="checkbox"/>	Rotação: <input checked="" type="checkbox"/>	Rotação: <input type="checkbox"/>	Rotação: <input type="checkbox"/>
Número de movimentos: 216	Número de movimentos: 144	Número de movimentos: 0	Número de movimentos: 0

Figura 18: Informações e Resultados dos Manipuladores

Na figura acima apresentam-se dois manipuladores, um com a restrição de peso (6kg Max) e outro sem esta. Ambos apresentam as mesmas dimensões (210x210). Para ambos, habilitada a opção de rotação no eixo z.

Abaixo das imagens ilustrativas dos mesmos, pode-se observar os respectivos resultados de cada um deles de maneira resumida.

### 3.4.3.4 Formulário de Inputs dos Manipuladores

Para inserção das características dos manipuladores, criou-se um formulário próprio para eles. Este formulário é acedido através da habilitação do teste em um dos 4 campos de inserção de manipuladores.

Foram inseridos quatro tipos de manipuladores no formulário:



Figura 19: Formulário de Inputs dos manipuladores

O primeiro dos manipuladores é o manipulador por fricção, que possui a restrição por peso além das restrições dimensionais. O segundo e o terceiro são manipuladores por garras, duplas e simples, respetivamente. Estes são virtualmente equivalentes entre si. O último representa um manipulador por sucção, que é virtualmente equivalente ao primeiro, por fricção possuindo a restrição do peso, além da dimensional.

Depois de selecionado o tipo de manipulador, e suas restrições, de acordo com o tipo selecionado, pode-se conferir à garra a capacidade ou não de rotacionar em seu próprio eixo z, dando a ela a capacidade de selecionar grupos de caixa mais diversificados. Esta característica é selecionável no formulário principal para todos os tipos de manipuladores.

Optou-se por inserir 4 tipos de manipuladores para que o usuário possa identificar melhor o tipo de manipulador que possui para análise sem ter de se preocupar com quais são as características relevantes de cada um. Como explanado em secções anteriores, sabe-se da existência de inúmeras particularidades de cada um dos

manipuladores, mas para este trabalho, considerou-se apenas a peculiaridade da restrição ou não do peso.

#### 3.4.3.5 Lista de Cálculos

Este último campo é basicamente uma apresentação dos resultados parciais de forma que o utilizador perceba a sequência de cálculos feita pelo programa para chegar até o resultado apresentado. Nesta lista (Figura 20) são mostrados os resultados de cada manipulador individualmente e de cada grupo orientado, deixando de maneira explícita todos os resultados parciais de otimização e cálculos feitos pelo programa até chegar nos resultados finais que também são apresentados nos campos dos manipuladores.

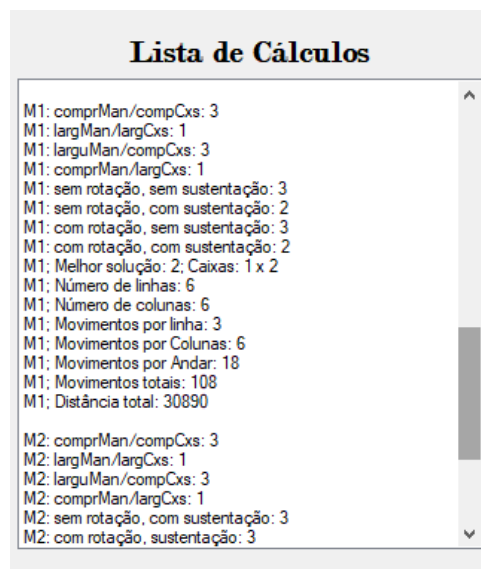


Figura 20: Lista de Cálculos

Neste campo de cálculos também se adicionou a apresentação do tempo de processamento dos cálculos para que se possa fazer avaliação computacional dos algoritmos.





# **VALIDAÇÕES DE RESULTADOS E ANÁLISE DOS TEMPOS COMPUTACIONAIS**

**4.1 PADRÕES PARA VALIDAÇÃO DE RESULTADOS**

**4.2 MANIPULADORES**

**4.3 OTIMIZAÇÃO DO ESPAÇO INTERNO DO MANIPULADOR  
COM A ADIÇÃO DA RESTRIÇÃO DO PESO**

**4.4 DISTÂNCIA PERCORRIDA PELO MANIPULADOR**

**4.5 RESULTADOS E TEMPOS DE PROCESSAMENTO**

**4.6 TEMPOS COMPUTACIONAIS DE CÁLCULO**



## 4 VALIDAÇÕES DE RESULTADOS E ANÁLISE DOS TEMPOS COMPUTACIONAIS

Para a validação dos resultados, foram criados padrões que fossem capazes de reproduzir as características buscadas em cada uma das heurísticas, mas ao mesmo tempo fossem simples a ponto desses resultados poderem ser visualizados e verificados manualmente.

Tendo esse pensamento, optou-se por verificar cada heurística separadamente. Primeiramente foram criados três padrões de carregamento simples. Se seguirmos a lógica de raciocínio usada ao longo do presente trabalho, ao final de qualquer tipo de carregamento, encontramos um grupo orientado, que nada mais é que um grupo de caixas, todas na mesma orientação. Com isso em mente, todos os paletes ao final se resumem a um palete simples, já que um palete simples nada mais é que um grupo orientado.

Dessa maneira, na palete simples foram testadas a capacidade de encontrar o maior número de caixas que o manipulador pode carregar somente com a restrição dimensional. Testou-se a capacidade de o algoritmo aplicar a restrição de peso de maneira adequada, ou seja, apresentando resultados coerentes e sem desvios dentro daquilo que se propunha e esperava para o mesmo. Por fim, testou-se a eficácia dos cálculos da distância percorrida pelo manipulador.

Como ao fim, todos os paletes são divididos em paletes simples, criou-se exemplos de paletes “duplo” e paletes quádruplos com diferentes configurações para que se testasse a capacidade do algoritmo de dividir os paletes nos grupos adequados.

### 4.1 PADRÕES PARA VALIDAÇÃO DE RESULTADOS

Para a realização da validação dos resultados como explanado acima e visualização dos tempos computacionais foram criados 5 padrões que correspondem a paletes simples, 3 paletes duplo, 3 paletes de 4 blocos e 2 paletes de 5 blocos.

Tabela 2: Padrões de Carregamento Utilizados nos Testes

Problema	Tamanho Palete	Tipo de Padrão	Dimensão das caixas	Número de andares	Orientação das caixas:	Quantidade de caixas (Totais / Por Andar)
1	1500x800x600	Simples	185x180x200	3	Horizontal	216 / 72
2	1100x950x600	Simples	150x100x100	6	Horizontal	378 / 63
3	1100x450x600	Simples	210x70x100	6	Horizontal	216 / 36
4	500x400x300	Simples	200x125x150	2	Vertical	16 / 08
5	700x500x800	Simples	200x150x100	8	Vertical	64 / 08
6	200x200x100	Duplo	100x50x30	3	Horizontal + Vertical	24 / 08
7	650x450x1000	Duplo	210x70x100	10	Horizontal + Vertical	180 / 18
8	650x600x1000	Duplo	200x60x50	20	Horizontal + Vertical	640 / 32
9	300x300x100	Quádruplo	150x50x30	3	Horizontal + Vertical	36 / 12
10	400x400x100	Quádruplo	200x60x30	3	Horizontal + Vertical	36 / 12
11	750x700x500	Quádruplo	200x100x100	5	Horizontal + Vertical	120 / 24
12	1800x1800x1000	5 grupos	300x200x200	5	Horizontal + Vertical	270 / 54
13	800x700x500	5 grupos	250x150x200	5	Horizontal + Vertical	85 / 17
14	900x800x1000	5 grupos	200x100x100	5	Horizontal + Vertical	120 / 24
15	200x200x100	4 grupos	100x50x30	3	Horizontal + Vertical	24 / 08

As representações gráficas e dos padrões de paletização encontram-se no Apêndice A

## 4.2 MANIPULADORES

Para a realização dos testes de validação e análise, criou-se 5 manipuladores que contemplassem várias possibilidades de análise e para cada um deles, adicionam-se possíveis restrições de número máximo de caixas a serem carregadas pelo peso. Cada manipulador foi criado de modo que coubessem dentro da sua área útil de carregamento um número de caixas específico de acordo com seu tamanho, previamente determinado, como descrito abaixo.

Tabela 3: Nº de Caixas Máximas Restringidas pelo Peso em cada Manipulador em cada Teste

Manipuladores	Nº Caixas Máx (Apenas Dimensão)	Formato	Nº Caixas Máx (Peso)
Manipulador 1	2	2x1	1
Manipulador 2	4	2x2	3 e 2
Manipulador 3	6	3x2	5, 4 e 3
Manipulador 4	12	4x3	10, 9, 8, 7 e 6
Manipulador 5	15	5x3	13, 12, 11, 10 e 9

#### 4.3 OTIMIZAÇÃO DO ESPAÇO INTERNO DO MANIPULADOR COM A ADIÇÃO DA RESTRIÇÃO DO PESO

As validações dos resultados foram divididas nas diferentes características do problema. Isso foi feito para que se pudesse validar de maneira eficaz e confiável os resultados obtidos pelo programa.

Para esse teste da restrição do peso, utilizou-se os padrões simples para que se pudesse testar e avaliar de uma maneira mais diversificada, as diferentes configurações dos manipuladores em si. Para cada padrão realizou-se testes com os 5 manipuladores diferentes.

#### 4.4 DISTÂNCIA PERCORRIDA PELO MANIPULADOR

A distância percorrida pelo manipulador foi verificada em cima do Padrão 900x800 de 5 grupos (Problema 13 do Apêndice A). Escolheu-se este padrão para verificação, pois ele possui diversas características que seria potenciais complicadores como espaços livres no interior da paleta e a última coordenada das caixas não coincidir com as coordenadas máximas da própria paleta.

Para que os testes fossem de validação mais clara, utilizou-se um manipulador que fosse capaz de carregar um grupo orientado completo em apenas um movimento. No caso, o

manipulador possui 500 x 300 unidades de comprimento, o que resultam, para o presente problema, um manipulador capaz de carregar um grupo feito de 4 caixas de 250 x 150.

Como as distâncias envolvem um ciclo de cálculos baseados nas coordenadas e nos grupos orientados, dividiu-se os resultados para que se pudesse aferir com maior confiabilidade os resultados obtidos. Ao final dos cálculos, utilizou-se do apoio de uma folha de cálculos com os respectivos valores de entrada e resultados, separados por grupo, para fins de conferência dos valores obtidos.

## 4.5 RESULTADOS E TEMPOS DE PROCESSAMENTO

### 4.5.1 Otimização do espaço interno do manipulador e Adição da restrição do peso.

Nesta verificação os resultados foram inseridos em tabelas divididos por problema testado. Foram testados 85 cenários. Os resultados são apresentados na forma de número de caixas a serem levadas pelo manipulador (“Resultado Manipulador” na Tabela 4), número de movimentos e distância percorrida pelo manipulador em unidades de comprimento. As demais informações contidas na tabela são a respeito da situação testada. São elas: o manipulador em questão e o seu tamanho em número de caixas, o peso das caixas, e o peso máximo restringido naquela situação em Kg.

As tabelas completas encontram-se presentes no Apêndice C. A análise pode ser feita apenas para o Problema 1, já que ela se faz muito semelhante para todos os outros.

Tabela 4: Resultados obtidos para validação da otimização do número caixas carregadas pelo manipulador no problema 1.

Manipulador	Tamanho Manip	Peso Caixas	Peso Máx	Nº Máx Caixas	Resultado Manipulador
1	2x1	3	6	2	2x1
		3	3	1	1x1
2	2x2	3	9	3	2x1
		3	6	2	2x1
3	3x2	3	15	5	2x2
		3	12	4	2x2
		3	9	3	2x1
4	4x3	3	30	10	3x3
		3	27	9	3x3
4	4x3	3	24	8	3x2
		3	21	7	3x2
		3	18	6	3x2
5	5x3	3	39	13	4x3
		3	36	12	4x3
		3	33	11	3x3
		3	30	10	3x3
		3	27	9	3x3

Observando os resultados, percebe-se que os resultados são dentro daquilo que se propôs ao criar o algoritmo. O programa analisa o número de caixas que o manipulador consegue carregar em cada uma de suas dimensões, analisa o máximo de caixas restringido pelo peso máximo de carregamento e resulta em um “novo manipulador” que carrega o número de caixas igual ou imediatamente inferior ao restrito pelo peso e que forma um grupo de caixas com formato de um paralelepípedo regular.



#### 4.5.2 Distância percorrida pelo manipulador

As tabelas com os cálculos mais detalhados feitos para fim da validação das distâncias percorridas pelo manipulador no problema elaborado na secção 3.5.2.3 encontram-se no Apêndice B.

Na folha detalhada pode-se identificar o passo a passo dos cálculos e a conferência de resultados. Os resultados são apresentados separados por grupos orientados. Dentro dos grupos, tem-se os resultados das distâncias percorridas para carregamento de cada nível daquele grupo.

Abaixo temos a Tabela 5 com os resultados obtidos pelo software, separados por bloco lado a lado com os resultados manuais obtidos.

Tabela 5: Exposição dos resultados manuais e obtidos pelo software

Bloco	Total Manual	Total Software
1	11.915,48	11.915
2	16.433,03	16.433
3	14.700,88	14.701
4	17.845,90	17.846
5	14.836,31	14.836
<b>Total</b>	<b>75.731,60</b>	<b>75.731</b>

#### 4.5.3 Avaliação de Resultados Gerais

Após inúmeros testes com variações de todos os tipos, selecionou-se os seguintes resultados para demonstrar a relevância das restrições estudadas. A seleção foi feita de forma a evidenciar as alterações de resultados que se pode obter variando ou não um parâmetro (restrição) específico(a). Os resultados encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Comparação de Resultados entre Cenários

Restrições				Resultados	
Manipulador	Peso	Rotação	Problema	Distância	Número de Movimentos
3	-	sim	3	94589	36
3	-	não	3	74346	36
4	4 caixas	sim	6	5046	9
4	4 caixas	sim	15	8868	12
3	-	sim	1	51866	18
5	-	sim	1	17234	6

As duas primeiras linhas evidenciam a alteração significativa do resultado da distância, em um mesmo carregamento quando, simplesmente, permitimos que o manipulador realize rotação em seu próprio eixo. Resultado esse explicado pela quantidade de caixas que o manipulador carrega poder ser maior quando este rotaciona.

As linhas 3 e 4 da tabela cumprem com a função de evidenciar como dois problemas com o mesmo número de caixas por nível, mas com arranjos diferentes de caixas, podem obter resultados diferentes com os mesmos parâmetros. Resultados estes que diferem tanto em número de movimentos quanto em distância percorrida.

Para as duas últimas linhas, o destaque é para a variação do manipulador para um mesmo problema. Por conta da diferença no número de caixas que cada um deles é capaz de carregar por movimento, temos resultados extremamente dispersos para um mesmo padrão de carregamento.

## 4.6 TEMPOS COMPUTACIONAIS DE CÁLCULO

### 4.6.1 Influência do Grau de Complexidade

Para esta análise buscou-se identificar a influência dos diferentes parâmetros nos tempos de cálculo do programa. Primeiramente o alvo foram as complexidades de paletes. Realizou-se 10 testes idênticos para as 4 complexidades. Considera-se a média desses 10 testes, o tempo computacional daquele problema.

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Os testes foram todos realizados em um processador Intel® Core™ i7-7700HQ CPU @2.80GHz, 2801 Mhz, 4 Cores, 8 Logical Processors.

Os problemas escolhidos foram decididos de forma aleatória dentro das 4 complexidades, sendo eles:

Tabela 7: Problemas selecionados para avaliação da influência da variação da complexidade nos tempos de cálculo do programa.

COMPLEXIDADE	PROBLEMA SELECIONADO
Simples	Problema 3
Duplo	Problema 7
4 Blocos	Problema 11
5 blocos	Problema 13

Os testes foram os mais simples possíveis, para evitar que os outros parâmetros influenciassem nos resultados. Configurou-se os testes de forma que o manipulador precisasse realizar pelo menos 2 movimentos para carregar cada nível de um grupo orientado. Dentro dessa restrição, um manipulador de 3 caixas x 2 caixas adequa-se para todos os problemas propostos.

Os resultados encontram-se tabelados por completo no Apêndice D. No gráfico abaixo podemos observar a diferença de tempo de processamento em função das diferentes complexidades apresentadas através das médias de tempo de processamento para cada um dos graus de complexidade testados:

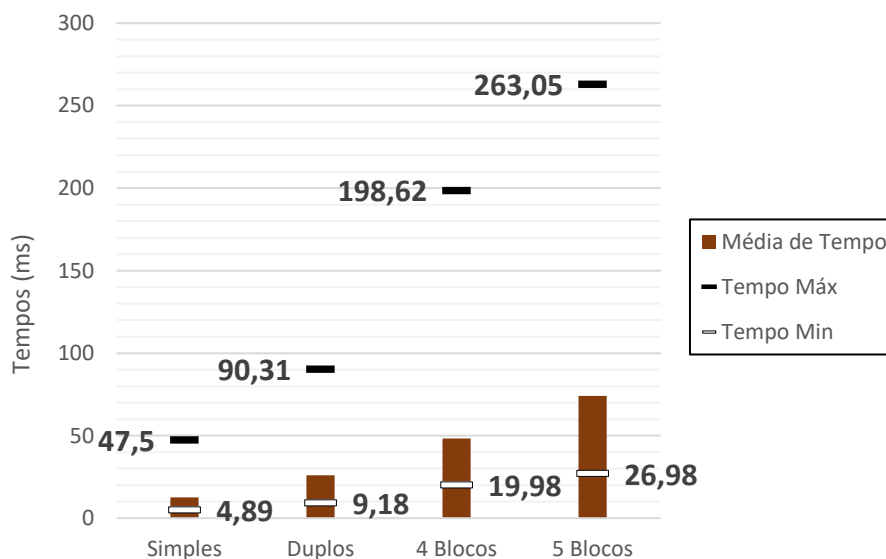


Figura 21: Tempos de processamento e dispersão de valores

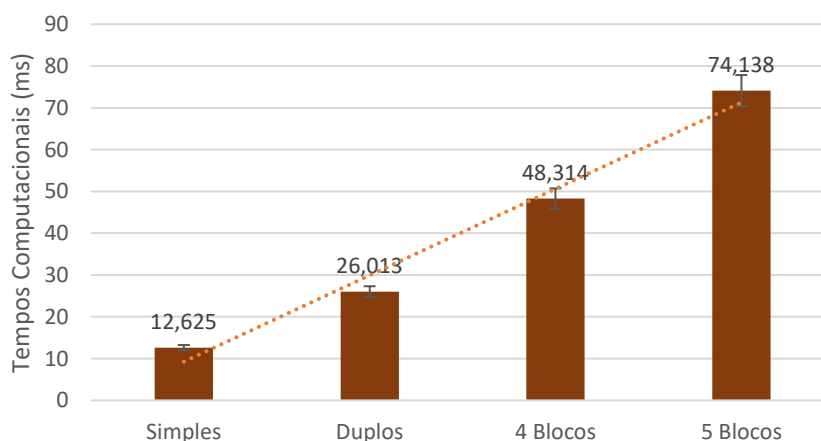


Figura 22: Evolução dos tempos de processamento em função da complexidade do problema proposto

Com esse formato de análise, consegue-se observar claramente o comportamento do tempo de cálculo. Fica evidente que o tempo computacional do programa cresce linearmente com o aumento da complexidade dos problemas fornecidos como entrada de dados.

Esse comportamento é justificável por conta da quantidade de ciclos que o programa realiza, já que em sua essência, o código trabalha para resumir a paleta em grupos e depois realiza os cálculos para solução dos mesmos. Então é natural que o tempo de

cálculo cresça nesse ritmo juntamente com o aumento do número de grupos orientacionais (ou grau de complexidade) que o problema apresenta.

#### 4.6.2 Influência das Restrições de Processamento

Para a avaliação dos outros parâmetros utilizou-se apenas os Problemas de complexidade simples 1, 2 e 3. Como o objetivo é enxergar como as características de manipulador, restrição de peso e capacidade de rotação influenciam nos tempos de cálculo, restringiu-se a complexidade à simples para que não seja a complexidade a influenciar nos resultados.

Abaixo podemos observar uma tabela com as médias de tempo obtidas nos testes com os problemas propostos. Esses resultados apresentam-se separados entre as médias pelos parâmetros e as médias gerais de cada um. Os resultados na íntegra encontram-se no Apêndice E.

Tabela 8: Tempos computacionais em ms e suas variações em função das restrições impostas

Problema		Capacidade de Rotação		Média
		Não	sim	
1				
Restrição de Peso	Sim	13,8695	16,8240	15,3468
	Não	15,8430	11,1830	13,5130
Média		14,8563	14,0035	14,4299
2				
Restrição de Peso	Sim	16,7970	36,3150	26,5560
	Não	16,1205	22,0900	19,1053
Média		16,4588	29,2025	22,8306
3				
Restrição de Peso	Sim	15,9350	28,6800	22,3075
	Não	29,8480	24,4815	27,1648
Média		22,8915	26,5808	24,7361
<b>Média Geral</b>		18,0688	23,2623	20,6655

As médias de tempo de cálculo apresentam um crescimento de 17,6% para o problema 1, 51% para o problema 2 e 44,4% para o problema 3 quando há a restrição de peso

presente nos cálculos. Entretanto, quando olhamos para os valores de tempo dentro dos mesmos problemas, porém sem a restrição do peso, uma queda de 25% é constatada no problema 1 e 18% para o problema 3 enquanto no problema 2 o tempo segue com um aumento de 27%.

Agora tomando como base os tempos de computação focando na adição da restrição do peso, temos novamente um comportamento complexo, porém com semelhanças em relação ao que vimos no parágrafo anterior. Quando olhamos para as variações de tempo onde a capacidade de rotação está presente, temos em todos os problemas um aumento de tempo ao acrescentarmos a restrição do peso (33% para o Problema 1; 28% para o Problema 2 e 15% para o Problema 3). Ao removermos a capacidade de rotacionar do cálculo, a média os tempos seguem apresentando um aumento no problema 2 (4%), porém (da mesma forma como na análise focada na capacidade rotativa) os tempos dos problemas 1 e 3 reduzem com a adição da redução do peso.

Desta maneira, torna-se inviável realizar uma previsão de tendência para os tempos computacionais de execução dos cálculos baseado na adição, tanto da restrição de peso, quanto da capacidade do manipulador rotacionar em seu próprio eixo.

#### 4.6.3 Análise Geral dos Tempos

Para a realização de todos os testes, análises e verificações feitas e apresentadas até aqui, foram realizadas um total de 392 resoluções de problemas utilizando o código, sob as mais diversas combinações de restrições e complexidades de problemas inseridos (Apêndice F). Utilizando esse banco de dados como base, tem-se que a média de tempo de resolução dos problemas é de 22,73 ms.



# CONCLUSÕES

## 5.1 CONCLUSÕES

## 5.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS





## 5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

Ao longo do trabalho, muito se discutiu sobre o Problema de Empacotamento de Paletes, principalmente focando no Problema do Produtor. Através do estudo e apreciação do estado da arte desse campo de pesquisa tão explorado pela Investigação Operacional, encontrou-se um nicho de oportunidade, onde a chance de expansão dessa área foi vislumbrada.

O estudo da inserção das garras manipuladoras de caixas como restrição na solução de problemas de paletização é uma característica ainda pouco explorada pela investigação. No presente trabalho, buscou-se abrir o campo, adicionando-se características, parâmetros a essa análise.

Utilizando destes estudos, tratou-se da elaboração de heurísticas, para que as características apreciadas fossem devidamente inseridas nas soluções de problemas já conhecidos. Trabalhou-se com algumas das possibilidades de tratar as garras manipuladoras (capacidade de rotacionar e peso) associadas à sua característica principal, a capacidade espacial de carga de itens, para que obtivéssemos um tipo de solução inovadora no campo dos problemas de paletização, a distância percorrida para uma garra carregar um palete e o número de movimentos que a mesma precisa realizar para carregar o mesmo.

Além dessa expansão do estudo, as verificações dos resultados mostraram que as heurísticas trazem valores de extrema confiabilidade, tornando o código não só uma ferramenta de pesquisa, mas também uma ferramenta com potencial de utilização a nível prático.

Ao fim, pode-se afirmar que se obteve sucesso ao cumprir com o ímpeto de discutir e propor uma nova abordagem para o problema de empacotamento de paletes não só do produtor, mas do problema como um todo, imaginando que se possa acrescentar as restrições de manipuladores ao problema de empacotamento de paletes do distribuidor

também. Além da nova abordagem, chegou-se a uma solução computacional através da aplicação das heurísticas desenvolvidas. Solução esta que apresenta resultados confiáveis para os problemas estudados dentro do presente trabalho.

Por fim, uma análise da eficiência computacional da combinação das heurísticas criadas mostrou que se pode obter soluções para esse tipo de problema utilizando de tempos de computação aplicáveis a qualquer análise dentro das estudadas, com resultados sendo obtidos em uma média de aproximadamente 23 milissegundos.

## 5.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Após a conclusão, uma vasta gama de avanços pode ser feita nesse campo de estudo. Inicialmente, o mais evidente dos avanços que pode ser feito é caminhar mais um passo e fazer com que a heurística traga como resultado, além dos movimentos e da distância percorrida, o tempo total que o manipulador em questão demoraria para efetuar o carregamento.

Ainda falando sobre os manipuladores, tem-se a possibilidade de expandir as características que funcionam como restrições de otimização, como por exemplo um manipulador que possui uma única posição de *release* dos itens, teria sempre de realizar movimentos a mais para carregar um palete. Outra característica é quanto ao cálculo das distâncias, onde diferentes tipos de manipuladores podem apresentar diferentes distâncias também por conta do ponto de *release* da carga.

Agora tratando do estudo dos padrões de carregamento temos a clara possibilidade de expansão dos graus de complexidade abordados pela heurística e juntamente com isso, podemos incluir graus de complexidade que envolvem os níveis em sua classificação. Por questões de estabilidade, comumente os paletes tem em seus carregamentos os níveis similares entre si, mas com rotações das posições das caixas.

# **BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO**



## BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Arslanov, M.Z., 2000. Continued fractions in optimal cutting of a rectangular sheet into equal small rectangles. *European Journal of Operational Research*. 125, 239–248.
- Barnett, S. and Kynch, G. J., (1967), Exact Solution of a Simple Cutting Problem, *Operations Research*, 15, issue 6, p. 1051-1056.
- Ben Messaoud, S., Chu, C., & Espinouse, M. L. (2008). Characterization and modelling of guillotine constraints. *European Journal of Operational Research*, 191(1), 110–124.
- Birgin, E.G., Morabito, R., Nishihara, F.H., 2005. A note on an L-approach for solving the manufacturer's pallet loading problem. *Journal of the Operational Research Society* 56, 1448–1451.
- Birgin, E.G., Lobato, R., Morabito, R., 2010. An effective recursive partitioning approach for the packing of identical rectangles in a rectangle. *Journal of the Operational Research Society* 61, 306–320.
- Bischoff, E. E., & Ratcliff, M. S. W. (1995). Loading Multiple Pallets. *Journal of the Operational Research Society*, 46(11), 1322–1336.
- Chen, Hao (2010). Comparative Study of C, C++, C# and Java Programming Languages. Degree Program of Information Technology. *Vaasan Ammattikorkeakoulu University of Technology*.
- Dyckhoff, H. (1990). A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 44(2), 145–159.
- Faccio, A. P. (2008). Propostas de Solução para o Problema de Corte de Estoque Bidimensional de uma Fábrica de Móveis de Pequeno Porte, (17), 137.
- Fritsch A., Vornberger O. (1995) Cutting Stock by Iterated Matching. In: Derigs U., Bachem A., Drexl A. (eds) Operations Research Proceedings 1994. *Operations Research Proceedings (GOR (Gesellschaft für Operations Research e.V.))*, vol 1994. Springer, Berlin, Heidelberg.

- Gilmore, P.C. & Gomory, Ralph. (1961). A Linear Programming Approach to the Cutting Stock Problem—Part II. *Operations Research*. 11. 10.1287/opre.11.6.863.
- Letchford, A.N., Amaral, A., 2001. Analysis of upper bounds for the pallet loading problem. *European Journal of Operational Research* 132, 582–593.
- Poldi, K. C. (2003). Algumas extensões do problema de corte de estoque. Dissertação de Mestrado, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, *Universidade de São Paulo, São Carlos*.
- Ribeiro, G. M., & Lorena, L. A. N. (2007). Lagrangean relaxation with clusters and column generation for the manufacturer's pallet loading problem. *Computers and Operations Research*, 34(9), 2695–2708.
- Robert W. Haessler (1978) A Procedure for Solving the 1.5-Dimensional Coil Slitting Problem, *A I I E Transactions*, 10:1, 70-75.
- Silva, E., Oliveira, J. F., & Wäscher, G. (2016). The pallet loading problem: A review of solution methods and computational experiments. *International Transactions in Operational Research*, 23(1–2), 147–172.
- Scheithauer, G., & Terno, J. (1996). The G4-heuristic for the pallet loading problem. *Journal of the Operational Research Society*, 47(4), 511–522.
- Scheithauer, G. (2018). *Introduction to Cutting and Packing Optimization: Problems, Modeling Approaches, Solution Methods*. Dresden, Germany: Springer.
- Wäscher, G., H., & Schumann, H. (2007). An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(3), 1109–1130.
- Wu, K.C., Ting, C.J., 2007. A two-phase algorithm for the manufacturer's pallet loading problem. In Helander, M., Xie, M., Jiao, Tan, C.T. (eds), *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. Singapore, pp. 1574–1578.
- Young-Gun, G., Maing-Kyu, K., 2001. A fast algorithm for two-dimensional pallet loading problems of large size. *European Journal of Operational Research* 134, 193–202.

# ANEXOS E APÊNDICES





## ANEXOS E APÊNDICES

### ANEXO A - EXEMPLOS DE CLASSIFICAÇÃO DE DYCKHOFF

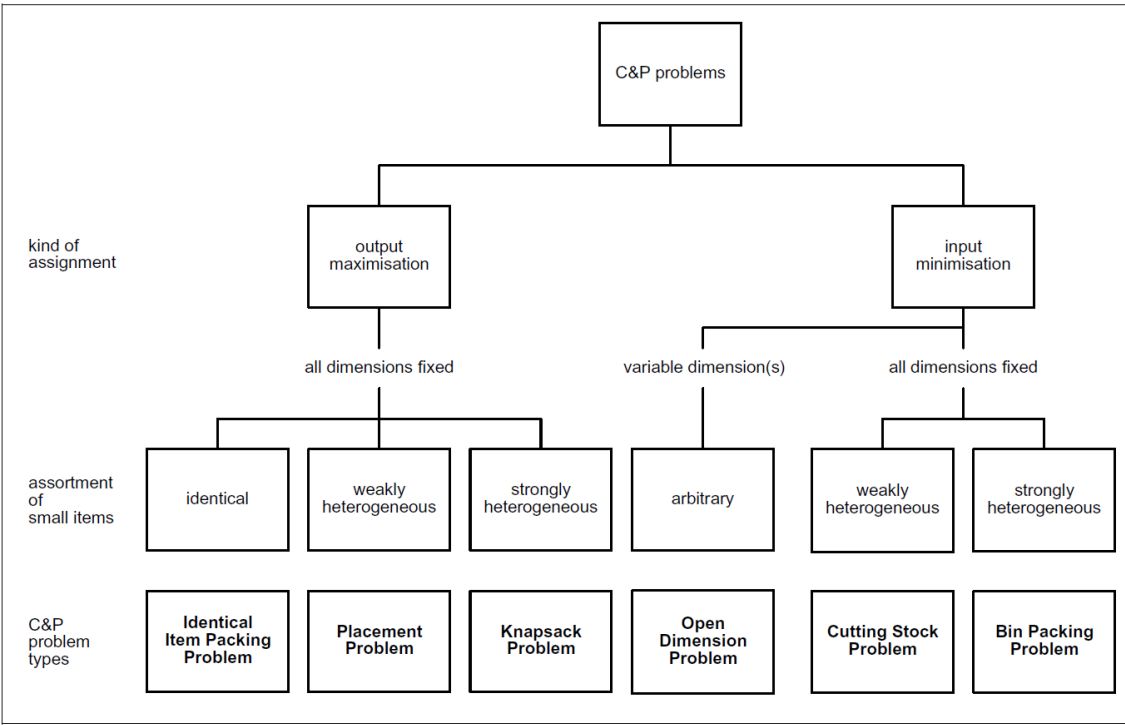
DICKHOFF, 1990. "Notions assigned to corresponding combined types". *A typology of cutting and packing problems*, p. 155. North-Holland. European Journal of Operational Research.

**Table 3**  
Notions assigned to corresponding combined types

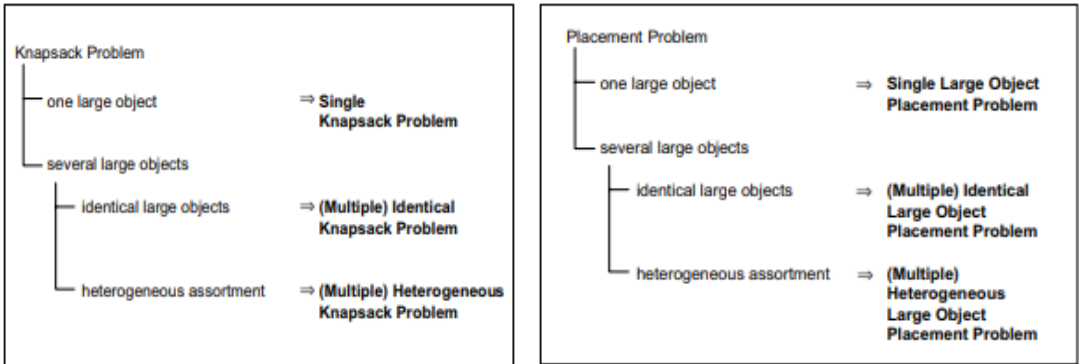
Notion	Belongs to type
(Classical) knapsack problem	1/B/O/
Pallet loading problem	2/B/O/C
More-dimensional knapsack problem	/B/O/
Dual bin packing problem	1/B/O/M
Vehicle loading problem	1/V/I/F, or 1/V/I/M
Container loading problem	3/V/I/, or 3/B/O/
(Classical) bin packing problem	1/V/I/M
Classical cutting stock problem	1/V/I/R
2-dimensional bin packing problem	2/V/D/M
Usual 2-dimensional cutting stock problem	2/V/I/R
General cutting stock or trim loss problem	1/ / /, 2/ / /, or 3/ / /
Assembly line balancing problem	1/V/I/M
Multiprocessor scheduling problem	1/V/I/M
Memory allocation problem	1/V/I/M
Change making problem	1/B/O/R
Multi-period capital budgeting problem	$n$ /B/O/

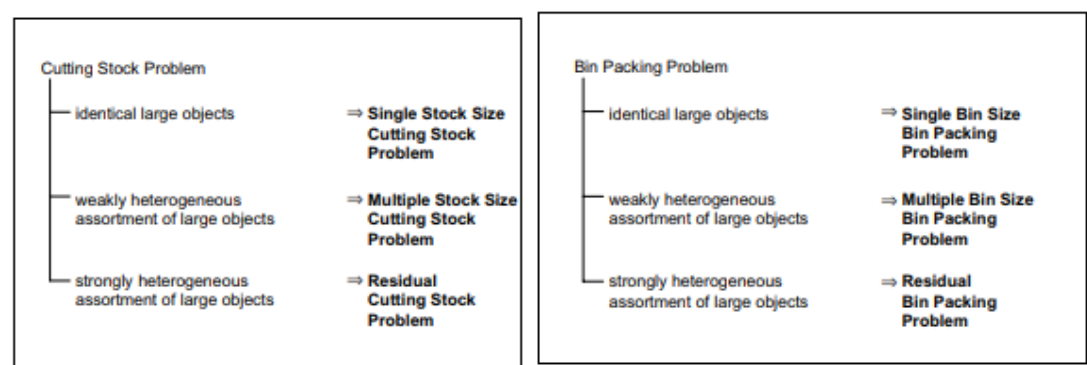
ANEXO B - CLASSIFICAÇÃO DE PROBLEMAS DE CORTE E EMPACOTAMENTO POR WÄSCHER ET AL (2007).

Problemas Básicos



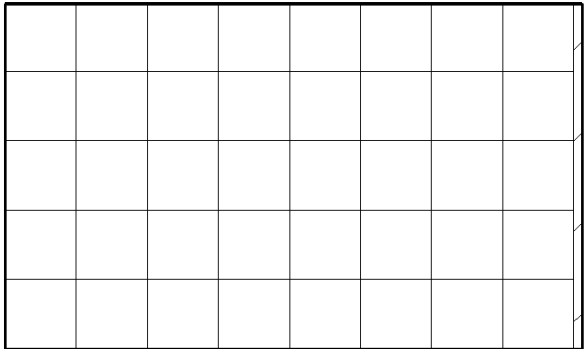
Problemas Intermédios





APÊNDICE A – PADRÕES DE PALETIZAÇÃO E SUAS REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS

Problema 1 – 1500x900



Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	185	180	200	3
2	0	180	0	185	360	200	3
3	0	360	0	185	540	200	3
4	0	540	0	185	720	200	3
5	0	720	0	185	900	200	3
6	185	0	0	370	180	200	3
7	185	180	0	370	360	200	3
8	185	360	0	370	540	200	3
9	185	540	0	370	720	200	3
10	185	720	0	370	900	200	3
11	370	0	0	555	180	200	3
12	370	180	0	555	360	200	3
13	370	360	0	555	540	200	3
14	370	540	0	555	720	200	3
15	370	720	0	555	900	200	3
16	555	0	0	740	180	200	3
17	555	180	0	740	360	200	3
18	555	360	0	740	540	200	3
19	555	540	0	740	720	200	3
20	555	720	0	740	900	200	3
21	740	0	0	925	180	200	3
22	740	180	0	925	360	200	3
23	740	360	0	925	540	200	3

24	740	540	0	925	720	200	3
25	740	720	0	925	900	200	3
26	925	0	0	1110	180	200	3
27	925	180	0	1110	360	200	3
28	925	360	0	1110	540	200	3
29	925	540	0	1110	720	200	3
30	925	720	0	1110	900	200	3
31	1110	0	0	1295	180	200	3
32	1110	180	0	1295	360	200	3
33	1110	360	0	1295	540	200	3
34	1110	540	0	1295	720	200	3
35	1110	720	0	1295	900	200	3
36	1295	0	0	1480	180	200	3
37	1295	180	0	1480	360	200	3
38	1295	360	0	1480	540	200	3
39	1295	540	0	1480	720	200	3
40	1295	720	0	1480	900	200	3

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

Problema 2 – 1100x95


Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	150	100	100	5
2	0	100	0	150	200	100	5
3	0	200	0	150	300	100	5
4	0	300	0	150	400	100	5
5	0	400	0	150	500	100	5
6	0	500	0	150	600	100	5
7	0	600	0	150	700	100	5
8	0	700	0	150	800	100	5
9	0	800	0	150	900	100	5
10	150	0	0	300	100	100	5
11	150	100	0	300	200	100	5
12	150	200	0	300	300	100	5
13	150	300	0	300	400	100	5
14	150	400	0	300	500	100	5
15	150	500	0	300	600	100	5
16	150	600	0	300	700	100	5
17	150	700	0	300	800	100	5
18	150	800	0	300	900	100	5
19	300	0	0	450	100	100	5
20	300	100	0	450	200	100	5
21	300	200	0	450	300	100	5
22	300	300	0	450	400	100	5
23	300	400	0	450	500	100	5
24	300	500	0	450	600	100	5
25	300	600	0	450	700	100	5

26	300	700	0	450	800	100	5
27	300	800	0	450	900	100	5
28	450	0	0	600	100	100	5
29	450	100	0	600	200	100	5
30	450	200	0	600	300	100	5
31	450	300	0	600	400	100	5
32	450	400	0	600	500	100	5
33	450	500	0	600	600	100	5
34	450	600	0	600	700	100	5
35	450	700	0	600	800	100	5
36	450	800	0	600	900	100	5
37	600	0	0	750	100	100	5
38	600	100	0	750	200	100	5
39	600	200	0	750	300	100	5
40	600	300	0	750	400	100	5
41	600	400	0	750	500	100	5
42	600	500	0	750	600	100	5
43	600	600	0	750	700	100	5
44	600	700	0	750	800	100	5
45	600	800	0	750	900	100	5
46	750	0	0	900	100	100	5
47	750	100	0	900	200	100	5
48	750	200	0	900	300	100	5
49	750	300	0	900	400	100	5
50	750	400	0	900	500	100	5
51	750	500	0	900	600	100	5
52	750	600	0	900	700	100	5
53	750	700	0	900	800	100	5
54	750	800	0	900	900	100	5
55	900	0	0	1050	100	100	5
56	900	100	0	1050	200	100	5
57	900	200	0	1050	300	100	5
58	900	300	0	1050	400	100	5
59	900	400	0	1050	500	100	5
60	900	500	0	1050	600	100	5
61	900	600	0	1050	700	100	5
62	900	700	0	1050	800	100	5
63	900	800	0	1050	900	100	5

Problema 3 – 1100x450

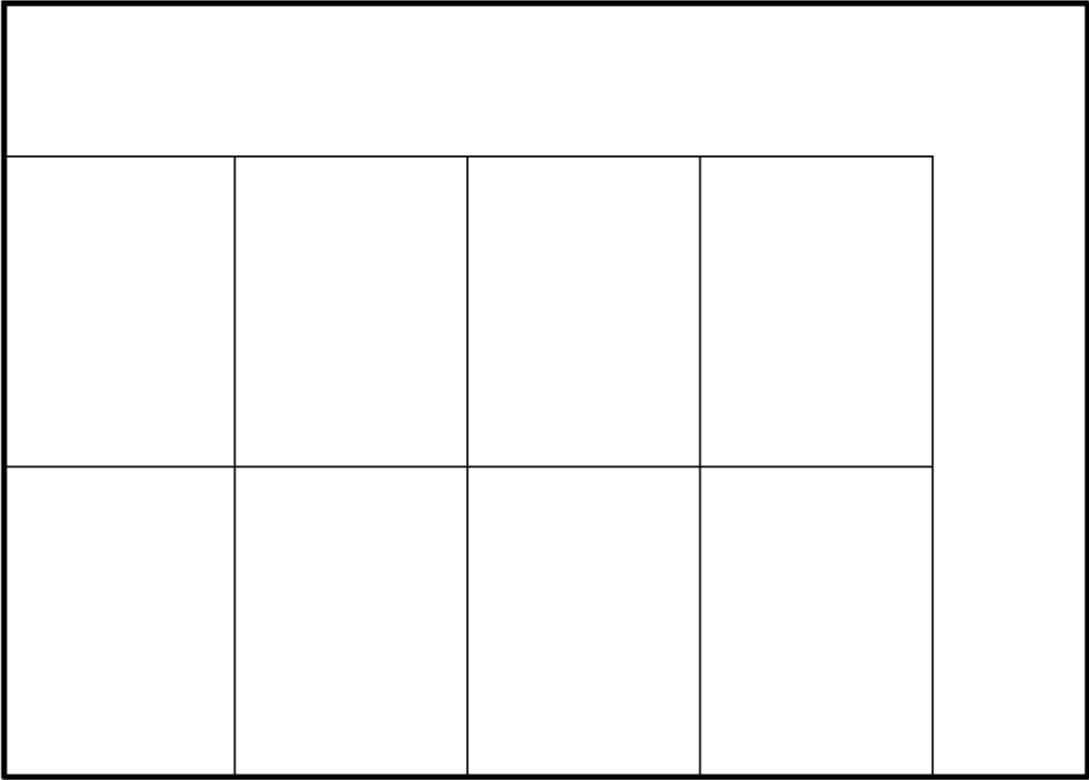

Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	210	70	100	3
2	0	70	0	210	140	100	3
3	0	140	0	210	210	100	3
4	0	210	0	210	280	100	3
5	0	280	0	210	350	100	3
6	0	350	0	210	420	100	3
7	210	0	0	420	70	100	3
8	210	70	0	420	140	100	3
9	210	140	0	420	210	100	3
10	210	210	0	420	280	100	3
11	210	280	0	420	350	100	3
12	210	350	0	420	420	100	3
13	420	0	0	630	70	100	3
14	420	70	0	630	140	100	3
15	420	140	0	630	210	100	3
16	420	210	0	630	280	100	3
17	420	280	0	630	350	100	3
18	420	350	0	630	420	100	3
19	630	0	0	840	70	100	3
20	630	70	0	840	140	100	3
21	630	140	0	840	210	100	3
22	630	210	0	840	280	100	3
23	630	280	0	840	350	100	3
24	630	350	0	840	420	100	3
25	840	0	0	1050	70	100	3
26	840	70	0	1050	140	100	3
27	840	140	0	1050	210	100	3
28	840	210	0	1050	280	100	3
29	840	280	0	1050	350	100	3
30	840	350	0	1050	420	100	3
31	1050	0	0	1260	70	100	3
32	1050	70	0	1260	140	100	3
33	1050	140	0	1260	210	100	3
34	1050	210	0	1260	280	100	3
35	1050	280	0	1260	350	100	3
36	1050	350	0	1260	420	100	3

Problema 4 - 500x500


Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	125	200	150	2
2	125	0	0	250	200	150	2
3	250	0	0	375	200	150	2
4	375	0	0	500	200	150	2
5	0	200	0	125	400	150	2
6	125	200	0	250	400	150	2
7	250	200	0	375	400	150	2
8	375	200	0	500	400	150	2

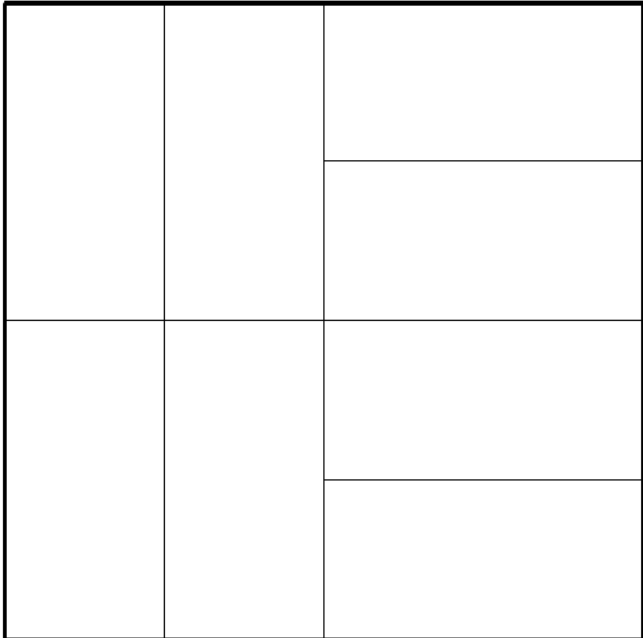


Problema 5 - 700x500



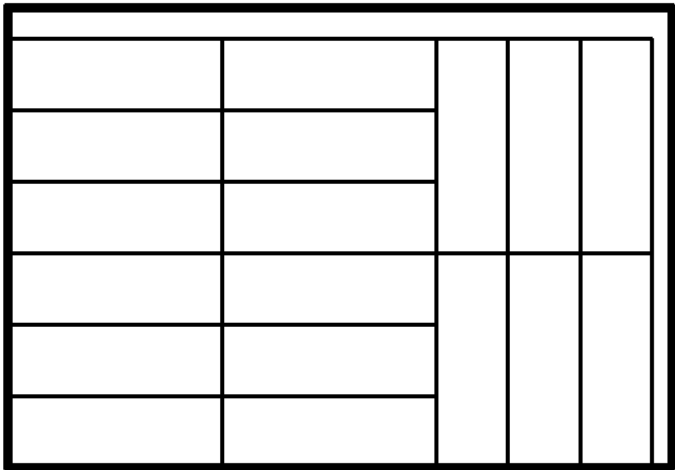
Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	150	200	100	4
2	150	0	0	300	200	100	4
3	300	0	0	450	200	100	4
4	450	0	0	600	200	100	4
5	0	200	0	150	400	100	4
6	150	200	0	300	400	100	4
7	300	200	0	450	400	100	4
8	450	200	0	600	400	100	4

Problema 6 – 200x200



Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	50	100	30	5
2	50	0	0	100	100	30	5
3	0	100	0	50	200	30	5
4	50	100	0	100	200	30	5
5	100	0	0	200	50	30	5
6	100	50	0	200	100	30	5
7	100	100	0	200	150	30	5
8	100	150	0	200	200	30	5

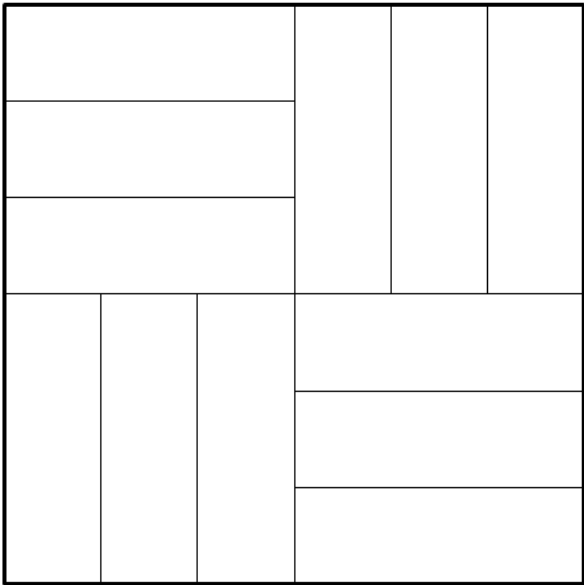
Problema 7 – 650x450



Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	210	70	100	7
2	210	0	0	420	70	100	7
3	0	70	0	210	140	100	7
4	210	70	0	420	140	100	7
5	0	140	0	210	210	100	7
6	210	140	0	420	210	100	7
7	0	210	0	210	280	100	7
8	210	210	0	420	280	100	7
9	0	280	0	210	350	100	7
10	210	280	0	420	350	100	7
11	0	350	0	210	420	100	7
12	210	350	0	420	420	100	7
13	420	0	0	490	210	100	7
14	490	0	0	560	210	100	7
15	560	0	0	630	210	100	7
16	420	210	0	490	420	100	7
17	490	210	0	560	420	100	7
18	560	210	0	630	420	100	7

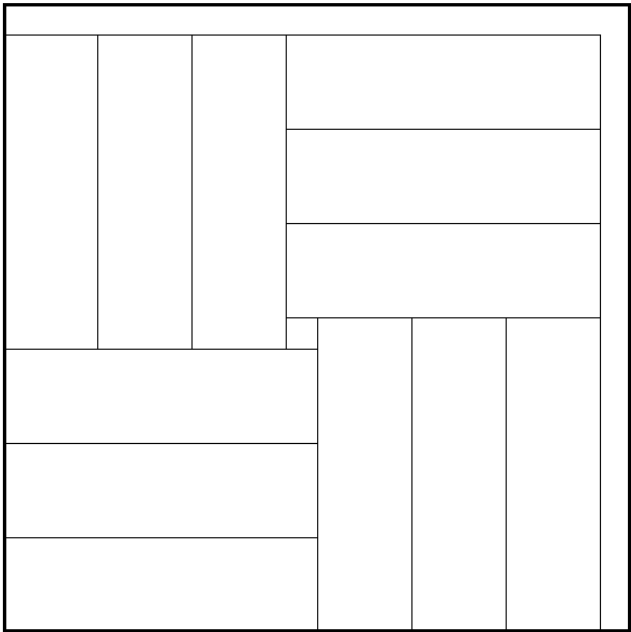


Problema 9 – 300x300



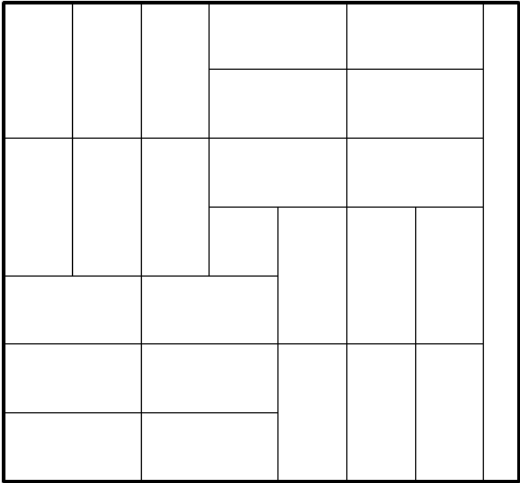
Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	50	150	30	5
2	50	0	0	100	150	30	5
3	100	0	0	150	150	30	5
4	0	150	0	150	200	30	5
5	0	200	0	150	250	30	5
6	0	250	0	150	300	30	5
7	150	0	0	300	50	30	5
8	150	50	0	300	100	30	5
9	150	100	0	300	150	30	5
10	150	150	0	200	300	30	5
11	200	150	0	250	300	30	5
12	250	150	0	300	300	30	5

Problema 10 – 400x400



Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	200	60	30	4
2	0	60	0	200	120	30	4
3	0	120	0	200	180	30	4
4	0	180	0	60	380	30	4
5	60	180	0	120	280	30	4
6	120	180	0	180	380	30	4
7	200	0	0	260	200	30	4
8	260	0	0	320	200	30	4
9	320	0	0	380	200	30	4
10	180	200	0	380	260	30	4
11	180	260	0	380	320	30	4
12	180	320	0	380	380	30	4

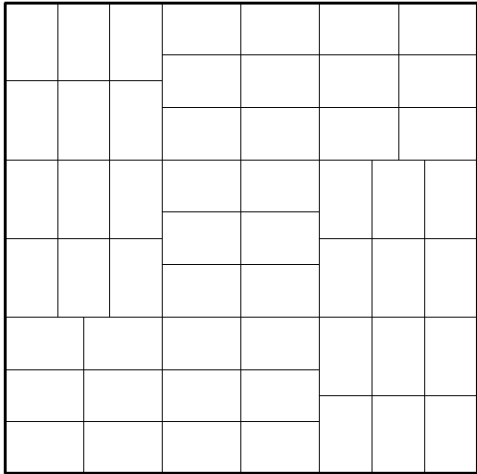
Problema 11 – 750x700



Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	200	100	100	9
2	200	0	0	400	100	100	9
3	0	100	0	200	200	100	9
4	200	100	0	400	200	100	9
5	0	200	0	200	300	100	9
6	200	200	0	400	300	100	9
7	0	300	0	100	500	100	9
8	100	300	0	200	500	100	9
9	200	300	0	300	500	100	9
10	0	500	0	100	700	100	9
11	100	500	0	200	700	100	9
12	200	500	0	300	700	100	9

13	400	0	0	500	200	100	9
14	500	0	0	600	200	100	9
15	600	0	0	700	200	100	9
16	400	200	0	500	400	100	9
17	500	200	0	600	400	100	9
18	600	200	0	700	400	100	9
19	300	400	0	500	500	100	9
20	500	400	0	700	500	100	9
21	300	500	0	500	600	100	9
22	500	500	0	700	600	100	9
23	300	600	0	500	700	100	9
24	500	600	0	700	700	100	9

Problema 12 – 1800x1800



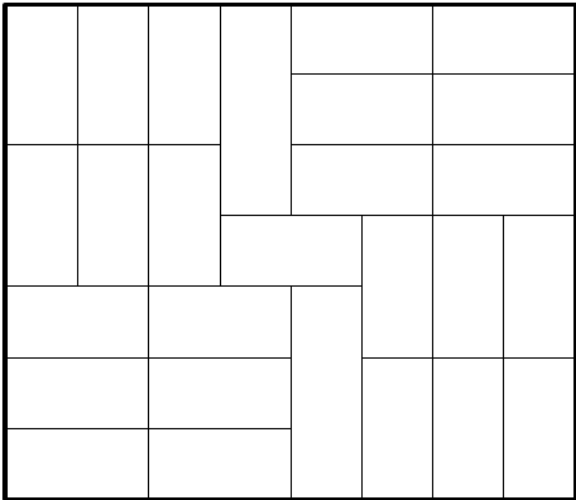
Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	300	200	200	5
2	300	0	0	600	200	200	5
3	600	0	0	900	200	200	5
4	900	0	0	1200	200	200	5
5	0	200	0	300	400	200	5
6	300	200	0	600	400	200	5
7	600	200	0	900	400	200	5
8	900	200	0	1200	400	200	5
9	0	400	0	300	600	200	5
10	300	400	0	600	600	200	5
11	600	400	0	900	600	200	5
12	900	400	0	1200	600	200	5
13	0	600	0	200	900	200	5
14	200	600	0	400	900	200	5
15	400	600	0	600	900	200	5
16	0	900	0	200	1200	200	5
17	200	900	0	400	1200	200	5
18	400	900	0	600	1200	200	5
19	0	1200	0	200	1500	200	5
20	200	1200	0	400	1500	200	5
21	400	1200	0	600	1500	200	5
22	0	1500	0	200	1800	200	5
23	200	1500	0	400	1800	200	5
24	400	1500	0	600	1800	200	5
25	1200	0	0	1400	300	200	5
26	1400	0	0	1600	300	200	5
27	1600	0	0	1800	300	200	5
28	1200	300	0	1400	600	200	5
29	1400	300	0	1600	600	200	5
30	1600	300	0	1800	600	200	5
31	1200	600	0	1400	900	200	5
32	1400	600	0	1600	900	200	5
33	1600	600	0	1800	900	200	5

34	1200	900	0	1400	1200	200	5
35	1400	900	0	1600	1200	200	5
36	1600	900	0	1800	1200	200	5
37	600	1200	0	900	1400	200	5
38	900	1200	0	1200	1400	200	5
39	1200	1200	0	1500	1400	200	5
40	1500	1200	0	1800	1400	200	5
41	600	1400	0	900	1600	200	5
42	900	1400	0	1200	1600	200	5
43	1200	1400	0	1500	1600	200	5
44	1500	1400	0	1800	1600	200	5
45	600	1600	0	900	1800	200	5
46	900	1600	0	1200	1800	200	5
47	1200	1600	0	1500	1800	200	5
48	1500	1600	0	1800	1800	200	5
49	600	600	0	900	800	200	5
50	900	600	0	1200	800	200	5
51	600	800	0	900	1000	200	5
52	900	800	0	1200	1000	200	5
53	600	1000	0	900	1200	200	5
54	900	1000	0	1200	1200	200	5

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.



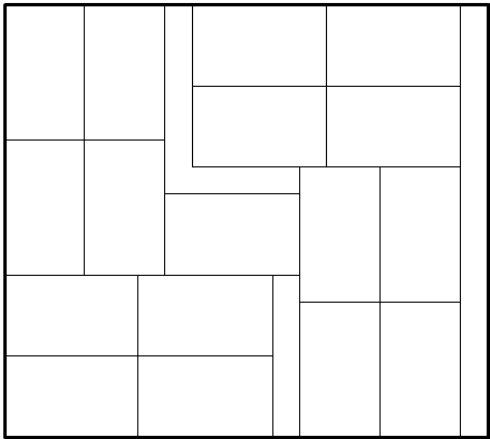
Problema 13 – 800x700



Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	200	100	100	9
2	200	0	0	400	100	100	9
3	0	100	0	200	200	100	9
4	200	100	0	400	200	100	9
5	0	200	0	200	300	100	9
6	200	200	0	400	300	100	9
7	0	300	0	100	500	100	9
8	100	300	0	200	500	100	9
9	200	300	0	300	500	100	9
10	0	500	0	100	700	100	9
11	100	500	0	200	700	100	9
12	200	500	0	300	700	100	9
13	500	0	0	600	200	100	9
14	600	0	0	700	200	100	9
15	700	0	0	800	200	100	9
16	500	200	0	600	400	100	9
17	600	200	0	700	400	100	9
18	700	200	0	800	400	100	9
19	400	400	0	600	500	100	9
20	600	400	0	800	500	100	9
21	400	500	0	600	600	100	9
22	600	500	0	800	600	100	9
23	400	600	0	600	700	100	9
24	600	600	0	800	700	100	9
25	300	300	0	500	400	100	9

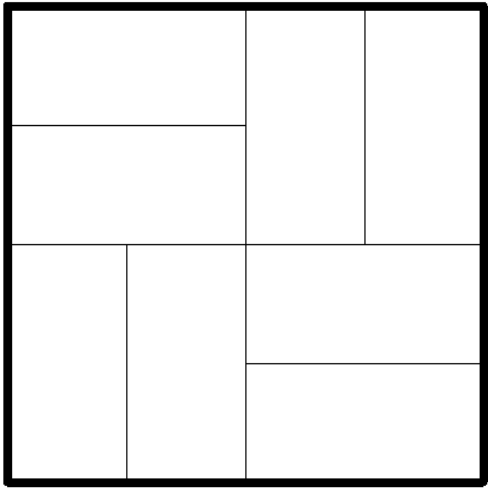
O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

Problema 14 – 900x800



Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	250	150	300	5
2	250	0	0	500	150	300	5
3	0	150	0	250	300	300	5
4	250	150	0	500	300	300	5
5	0	300	0	150	550	300	5
6	150	300	0	300	550	300	5
7	0	550	0	150	800	300	5
8	150	550	0	300	800	300	5
9	550	0	0	700	250	300	5
10	700	0	0	850	250	300	5
11	550	250	0	700	500	300	5
12	700	250	0	850	500	300	5
13	350	500	0	600	650	300	5
14	600	500	0	850	650	300	5
15	350	650	0	600	800	300	5
16	600	650	0	850	800	300	5
17	300	300	0	550	450	300	5

Problema 15 – 200x200



Caixa	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	P
1	0	0	0	50	100	30	5
2	50	0	0	100	100	30	5
3	0	100	0	100	150	30	5
4	0	150	0	100	200	30	5
5	100	0	0	200	50	30	5
6	100	50	0	200	100	30	5
7	100	100	0	150	200	30	5
8	150	100	0	200	200	30	5

## APÊNDICE B – FOLHA DE CONFERÊNCIA DOS CÁLCULOS DE DISTÂNCIA DO PROBLEMA 13

Bloco	X1	Y1	X2	Y2	h	Nível	Dxy	Dz	total
1	0	0	500	300	300	1	583,0952	600	1183,1
	0	0	500	300	300	2	583,0952	1200	1783,1
	0	0	500	300	300	3	583,0952	1800	2383,1
	0	0	500	300	300	4	583,0952	2400	2983,1
	0	0	500	300	300	5	583,0952	3000	3583,1
Total bloco									11915
Bloco	X1	Y1	X2	Y2	h	Nível	Dxy	Dz	total
2	550	0	850	500	300	1	1486,607	600	2086,6
	550	0	850	500	300	2	1486,607	1200	2686,6
	550	0	850	500	300	3	1486,607	1800	3286,6
	550	0	850	500	300	4	1486,607	2400	3886,6
	550	0	850	500	300	5	1486,607	3000	4486,6
Total bloco									16433
Bloco	X1	Y1	X2	Y2	h	Nível	Dxy	Dz	total
3	0	300	300	800	300	1	1140,175	600	1740,2
	0	300	300	800	300	2	1140,175	1200	2340,2
	0	300	300	800	300	3	1140,175	1800	2940,2
	0	300	300	800	300	4	1140,175	2400	3540,2
	0	300	300	800	300	5	1140,175	3000	4140,2
Total bloco									14701
Bloco	X1	Y1	X2	Y2	h	Nível	Dxy	Dz	total
4	350	500	850	800	300	1	1769,181	600	2369,2
	350	500	850	800	300	2	1769,181	1200	2969,2
	350	500	850	800	300	3	1769,181	1800	3569,2
	350	500	850	800	300	4	1769,181	2400	4169,2
	350	500	850	800	300	5	1769,181	3000	4769,2
Total bloco									17846

Bloco	X1	Y1	X2	Y2	h	Nível	Dxy	Dz	total
5	300	300	550	500	300	1	1167,262	600	1767,3
	300	300	550	500	300	2	1167,262	1200	2367,3
	300	300	550	500	300	3	1167,262	1800	2967,3
	300	300	550	500	300	4	1167,262	2400	3567,3
	300	300	550	500	300	5	1167,262	3000	4167,3
Total bloco									14836

Distância Total	75732
--------------------	-------

## APÊNDICE C – TABELAS DE RESULTADOS PARA VALIDAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO DO ESPAÇO INTERNO DO MANIPULADOR

### PROBLEMA 1

Manipulador	Tamanho Manip	Peso Caixas	Peso Máx	Nº Máx Caixas	Resultado Manip.	Nº de Movimentos	Distância Percorrida (u.c.)
1	2x1	3	6	2	2x1	60	272724
		3	3	1	1x1	120	315802
2	2x2	3	9	3	2x1	60	272724
		3	6	2	2x1	60	272724
3	3x2	3	15	5	2x2	36	98882
		3	12	4	2x2	36	98882
		3	9	3	2x1	60	272724
4	4x3	3	30	10	3x3	18	51866
		3	27	9	3x3	18	51866
		3	24	8	3x2	24	75890
		3	21	7	3x2	24	75890
		3	18	6	3x2	24	75890
5	5x3	3	39	13	4x3	12	60268
		3	36	12	4x3	12	60268
		3	33	11	3x3	18	51886
		3	30	10	3x3	18	51886
		3	27	9	3x3	18	51886

**PROBLEMA 2**

Manipulador	Tamanho Manip	Peso Caixas	Peso Máx	Nº Máx Caixas	Resultado Manip.	Nº de Movimentos	Distância Percorrida (u.c.)
1	2x1	4	10	2	2x1	210	501236
		4	5	1	1x1	378	874828
2	2x2	4	15	3	2x1	210	501236
		4	10	2	2x1	210	512677
3	3x2	4	25	5	2x2	120	300247
		4	20	4	2x2	120	300247
		4	15	3	3x1	126	364618
4	4x3	4	50	10	3x3	54	131004
		4	45	9	3x3	54	131004
		4	40	8	4x2	60	149614
		4	35	7	3x2	72	230471
		4	30	6	3x2	72	230471
5	5x3	4	65	13	4x3	36	84799
		4	60	12	4x3	36	84799
		4	55	11	3x3	54	131004
		4	50	10	3x3	54	121004
		4	45	9	3x3	54	121004

**PROBLEMA 3**

Manipulador	Tamanho Manip	Peso Caixas	Peso Máx	Nº Máx Caixas	Resultado Manip.	Nº de Movimentos	Distância Percorrida (u.c.)
1	2x1	2	4	2	2x1	108	223993
		2	2	1	1x1	216	449243
2	2x2	2	6	3	2x1	108	224432
		2	4	2	2x1	108	224431
3	3x2	2	10	5	2x2	54	111901
		2	8	4	2x2	54	111901
		2	6	3	3x1	72	148819
4	4x3	2	20	10	3x3	24	49493
		2	18	9	3x3	24	49493
		2	16	8	4x2	36	88669
		2	14	7	3x2	36	74495
		2	12	6	3x2	36	74495
5	5x3	2	26	13	4x3	24	59053
		2	24	12	4x3	24	59053
		2	22	11	5x2	36	103260
		2	20	10	5x2	36	103260
		2	18	9	3x3	24	49493



**PROBLEMA 4**

Manipulador	Tamanho Manip	Peso Caixas	Peso Máx	Nº Máx Caixas	Resultado Manip.	Nº de Movimentos	Distância Percorrida (u.c.)
1	2x1	2	4	2	2x1	6	10462
		2	2	1	1x1	12	13514
2	2x2	2	6	3	3x1	4	7101
		2	4	2	2x1	6	6702
3	3x2	2	10	5	2x2	4	5195
		2	8	4	4x1	4	7575
		2	6	3	3x1	4	7101
4	4x3	2	20	10	3x3	2	2315
		2	18	9	3x3	2	2315
		2	16	8	4x2	3	2576
		2	14	7	3x2	2	5411
		2	12	6	3x2	2	5411
5	5x3	2	26	13	4x3	2	2667
		2	24	12	4x3	2	2667
		2	22	11	5x2	2	2962
		2	20	10	5x2	2	2962
		2	18	9	3x3	2	2315

**PROBLEMA 5**

Manipulador	Tamanho Manip	Peso Caixas	Peso Máx	Nº Máx Caixas	Resultado Manip.	Nº de Movimentos	Distância Percorrida (u.c.)
1	2x1	4	8	2	2x1	24	36634
		4	4	1	1x1	48	73981
2	2x2	4	12	3	2x1	24	36634
		4	8	2	2x1	24	36634
3	3x2	4	20	5	2x2	16	26279
		4	16	4	4x1	16	26248
		4	12	3	3x1	16	24340
4	4x3	4	40	10	5x2	8	14000
		4	36	9	4x2	8	13200
		4	32	8	4x2	8	12696
		4	28	7	3x2	8	12017
		4	24	6	3x2	8	12017
5	5x3	4	52	13	4x3	8	14543
		4	48	12	4x3	8	14543
		4	44	11	5x2	8	14000
		4	40	10	5x2	8	14000
		4	36	9	4x2	8	12969

## APÊNDICE D - RESULTADOS DE TEMPOS DE PROCESSAMENTO - COMPLEXIDADE

Problema	Complexidade	Tempos (ms)	Problema	Complexidade	Tempos (ms)
3	simples	29,9	11	4 blocos	30,03
	simples	5,46		4 blocos	198,62
	simples	5,79		4 blocos	22,75
	simples	6,59		4 blocos	95,57
	simples	6,67		4 blocos	21,9
	simples	4,89		4 blocos	19,98
	simples	47,5		4 blocos	28,7
	simples	6,6		4 blocos	21,66
	simples	6,36		4 blocos	22,02
	simples	6,49		4 blocos	21,91
	<b>média</b>	<b>12,625</b>		<b>média</b>	<b>48,314</b>
7	duplo	84,28	13	5 blocos	30,77
	duplo	11,59		5 blocos	29,97
	duplo	9,18		5 blocos	27,13
	duplo	11,12		5 blocos	28,98
	duplo	10,08		5 blocos	26,98
	duplo	11,07		5 blocos	248,02
	duplo	90,31		5 blocos	27,71
	duplo	10,45		5 blocos	29,02
	duplo	9,55		5 blocos	263,05
	duplo	12,5		5 blocos	29,75
	<b>média</b>	<b>26,013</b>		<b>média</b>	<b>74,138</b>

## APÊNDICE E – RESULTADOS DE TEMPOS DE PROCESSAMENTO – DEMAIS RESTRIÇÕES

Problema	Manipulador	Tentativa	Cap. Rotacionar	Restrição de Peso	Tempo (ms)
1	3	1	não	não	21,66
1	3	2	não	não	4,59
1	3	3	não	não	4,77
1	3	4	não	não	5,75
1	3	5	não	não	5,17
1	3	6	não	não	4,67
1	3	7	não	não	5,7
1	3	8	não	não	5,69
1	3	9	não	não	6,11
1	3	10	não	não	89,75
1	3	1	sim	não	4,72
1	3	2	sim	não	4,31
1	3	3	sim	não	4,49
1	3	4	sim	não	4,3
1	3	5	sim	não	5,1
1	3	6	sim	não	7,02
1	3	7	sim	não	59,16
1	3	8	sim	não	4,43
1	3	9	sim	não	5,94
1	3	10	sim	não	9,6
1	3	1	não	2	17,64
1	3	2	não	2	3,81
1	3	3	não	2	3,76
1	3	4	não	2	3,78
1	3	5	não	2	61,28
1	3	6	não	2	60,28
1	3	7	não	2	3,73
1	3	9	não	2	4,58
1	3	10	não	2	3,85
1	3	1	sim	2	4,65
1	3	2	sim	2	4,29
1	3	3	sim	2	64,94
1	3	4	sim	2	58,65
1	3	5	sim	2	4,55

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Problema	Manipulador	Tentativa	Cap. Rotacionar	Restrição de Peso	Tempo (ms)
1	3	6	sim	2	4,55
1	3	7	sim	2	4,63
1	3	8	sim	2	4,63
1	3	9	sim	2	6,81
1	3	10	sim	2	5,18
1	5	1	não	não	3,67
1	5	2	não	não	43,91
1	5	3	não	não	42,37
1	5	4	não	não	3,87
1	5	5	não	não	4,19
1	5	6	não	não	3,46
1	5	7	não	não	3,89
1	5	8	não	não	14,92
1	5	9	não	não	27,15
1	5	10	não	não	15,63
1	5	1	sim	não	4,19
1	5	2	sim	não	5,03
1	5	3	sim	não	4,19
1	5	4	sim	não	4,34
1	5	5	sim	não	4,6
1	5	6	sim	não	48,24
1	5	7	sim	não	17,2
1	5	8	sim	não	4,64
1	5	9	sim	não	4,43
1	5	1	não	2	3,54
1	5	2	não	2	3,8
1	5	3	não	2	3,57
1	5	4	não	2	36,4
1	5	5	não	2	3,43
1	5	6	não	2	3,63
1	5	7	não	2	3,74
1	5	8	não	2	45,4
1	5	9	não	2	3,73
1	5	10	não	2	3,69
1	5	1	sim	2	4,68
1	5	2	sim	2	56,02
1	5	3	sim	2	55,49
1	5	4	sim	2	5,32

Problema	Manipulador	Tentativa	Cap. Rotacionar	Restrição de Peso	Tempo (ms)
1	5	5	sim	2	4,71
1	5	6	sim	2	4,51
1	5	7	sim	2	4,48
1	5	8	sim	2	27,9
1	5	9	sim	2	4,68
1	5	10	sim	2	5,89
2	3	1	não	não	14,13
2	3	2	não	não	5,36
2	3	3	não	não	4,04
2	3	4	não	não	3,95
2	3	5	não	não	51,21
2	3	6	não	não	45,8
2	3	7	não	não	5,33
2	3	8	não	não	4,09
2	3	9	não	não	4,91
2	3	10	não	não	33,03
2	3	1	sim	não	4,94
2	3	3	sim	não	84,41
2	3	4	sim	não	51,89
2	3	5	sim	não	4,81
2	3	6	sim	não	4,93
2	3	7	sim	não	6,17
2	3	8	sim	não	61,18
2	3	9	sim	não	4,87
2	3	10	sim	não	6,53
2	3	1	não	2	4,2
2	3	2	não	2	4,17
2	3	3	não	2	61,53
2	3	4	não	2	4,37
2	3	5	não	2	4,21
2	3	6	não	2	4,64
2	3	7	não	2	5,24
2	3	8	não	2	59,73
2	3	9	não	2	4,02
2	3	10	não	2	4,19
2	3	1	sim	2	5,02
2	3	2	sim	2	85,89
2	3	3	sim	2	60,69

Problema	Manipulador	Tentativa	Cap. Rotacionar	Restrição de Peso	Tempo (ms)
2	3	4	sim	2	5,34
2	3	5	sim	2	5,24
2	3	6	sim	2	4,9
2	3	7	sim	2	5,1
2	3	8	sim	2	5,23
2	3	9	sim	2	76,23
2	3	10	sim	2	76,42
2	5	1	não	não	189,57
2	5	2	não	não	17,97
2	5	3	não	não	6,3
2	5	5	não	não	46,84
2	5	6	não	não	7,29
2	5	7	não	não	5,51
2	5	8	não	não	99,33
2	5	9	não	não	5,22
2	5	10	não	não	6,69
2	5	1	sim	não	44,36
2	5	2	sim	não	13,72
2	5	3	sim	não	124,59
2	5	4	sim	não	18,69
2	5	5	sim	não	7,38
2	5	6	sim	não	10
2	5	7	sim	não	6,75
2	5	8	sim	não	7,6
2	5	9	sim	não	44,17
2	5	10	sim	não	7,01
2	5	1	não	2	24,12
2	5	2	não	2	5,92
2	5	3	não	2	6,83
2	5	4	não	2	73,02
2	5	5	não	2	6,45
2	5	6	não	2	5,89
2	5	7	não	2	7,1
2	5	8	não	2	55,88
2	5	9	não	2	5,81
2	5	10	não	2	5,29
2	5	1	sim	2	20,9
2	5	2	sim	2	6,89

Problema	Manipulador	Tentativa	Cap. Rotacionar	Restrição de Peso	Tempo (ms)
2	5	3	sim	2	6,93
2	5	4	sim	2	114,86
2	5	5	sim	2	31,74
2	5	7	sim	2	7,44
2	5	8	sim	2	7,96
2	5	9	sim	2	7,7
2	5	10	sim	2	184,76
3	3	1	não	não	17,9
3	3	2	não	não	5,71
3	3	3	não	não	5,28
3	3	4	não	não	85,7
3	3	5	não	não	5,98
3	3	6	não	não	6,8
3	3	7	não	não	7,09
3	3	8	não	não	6,43
3	3	9	não	não	71,06
3	3	10	não	não	4,75
3	3	1	sim	não	52,43
3	3	2	sim	não	6,11
3	3	3	sim	não	20,74
3	3	4	sim	não	6,44
3	3	5	sim	não	6,55
3	3	6	sim	não	18,1
3	3	7	sim	não	6,68
3	3	8	sim	não	6,86
3	3	9	sim	não	73,79
3	3	10	sim	não	7,93
3	3	1	não	2	6,42
3	3	2	não	2	17,86
3	3	3	não	2	6,38
3	3	4	não	2	5,82
3	3	5	não	2	53,93
3	3	6	não	2	5,85
3	3	7	não	2	6,04
3	3	9	não	2	5,9
3	3	10	não	2	6,3
3	3	1	sim	2	67,8
3	3	2	sim	2	6,92



Problema	Manipulador	Tentativa	Cap. Rotacionar	Restrição de Peso	Tempo (ms)
3	3	3	sim	2	7,3
3	3	4	sim	2	6,58
3	3	5	sim	2	80,81
3	3	6	sim	2	8,76
3	3	7	sim	2	8,8
3	3	8	sim	2	7,9
3	3	9	sim	2	97,7
3	3	10	sim	2	8,01
3	5	1	não	não	189,57
3	5	2	não	não	17,97
3	5	3	não	não	6,3
3	5	4	não	não	6,24
3	5	5	não	não	46,84
3	5	6	não	não	7,29
3	5	7	não	não	5,51
3	5	8	não	não	99,33
3	5	9	não	não	5,22
3	5	10	não	não	6,69
3	5	1	sim	não	44,36
3	5	2	sim	não	13,72
3	5	3	sim	não	124,59
3	5	4	sim	não	18,69
3	5	5	sim	não	7,38
3	5	6	sim	não	10
3	5	7	sim	não	6,75
3	5	8	sim	não	7,6
3	5	9	sim	não	44,17
3	5	1	não	2	24,12
3	5	2	não	2	5,92
3	5	3	não	2	6,83
3	5	4	não	2	73,02
3	5	5	não	2	6,45
3	5	6	não	2	5,89
3	5	7	não	2	7,1
3	5	8	não	2	55,88
3	5	9	não	2	5,81
3	5	10	não	2	5,29
3	5	1	sim	2	10,28

Problema	Manipulador	Tentativa	Cap. Rotacionar	Restrição de Peso	Tempo (ms)
3	5	2	sim	2	6,54
3	5	3	sim	2	101,98
3	5	4	sim	2	8,59
3	5	5	sim	2	8,47
3	5	6	sim	2	8,26
3	5	7	sim	2	8,6
3	5	8	sim	2	103,47
3	5	9	sim	2	8,78
3	5	10	sim	2	7,78

## APÊNDICE F – BANCO DE DADOS: TEMPOS DE PROCESSAMENTO

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
1	1	simples	1	2x1	sim	1	1x1	315802	120	9,3
2	1	simples	-	3x1	sim	3	3x1	247516	45	7,4
3	1	simples	1	2x1	sim	2	2x1	272724	60	12,97
4	1	simples	-	2x1	sim	não	2x1	272724	60	19,71
5	1	simples	1	2x2	sim	3	2x1	272724	60	11,04
6	1	simples	3	3x2	sim	5	2x2	98882	36	9,35
7	1	simples	3	3x2	sim	4	2x2	98882	36	9,56
8	1	simples	3	3x2	sim	3	2x1	272724	60	7,85
9	1	simples	4	4x3	sim	10	3x3	51866	18	21,4
10	1	simples	4	4x3	sim	9	3x3	51866	18	8,8
11	1	simples	4	4x3	sim	8	3x2	75890	24	7,41
12	1	simples	4	4x3	sim	7	3x2	75890	24	9,33
13	1	simples	4	4x3	sim	6	3x2	75890	24	8,74
14	1	simples	5	5x3	sim	13	4x3	60268	12	23,9
15	1	simples	5	5x3	sim	12	4x3	60268	12	7,69
16	1	simples	5	5x3	sim	11	3x3	51886	18	8,38
17	1	simples	5	5x3	sim	10	3x3	51886	18	11,38
18	1	simples	5	5x3	sim	9	3x3	51889	18	9,14
19	2	simples	1	2x1	sim	2	2x1	501236	210	7,58

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
20	2	simples	1	2x1	sim	1	1x1	874828	378	21,68
21	2	simples	2	2x2	não	3	2x1	501236	210	21,39
22	2	simples	2	2x2	sim	3	3x1	394494	162	49,3
23	2	simples	3	3x2	sim	5	2x2	300247	120	46,48
24	2	simples	3	3x2	sim	4	2x2	300247	120	6,45
25	2	simples	3	3x2	sim	3	3x1	364618	126	8,17
26	2	simples	3	3x2	não	3	3x1	364618	126	5,84
27	2	simples	4	4x3	sim	10	3x3	131004	54	19,23
28	2	simples	4	4x3	sim	9	3x3	131004	54	6,47
29	2	simples	4	4x3	sim	8	4x2	149614	60	6,91
30	2	simples	4	4x3	sim	7	3x2	230471	72	6,92
31	2	simples	4	4x3	sim	6	3x2	230471	72	6,67
32	2	simples	5	5x3	sim	13	4x3	84799	36	18,72
33	2	simples	5	5x3	sim	12	4x3	84799	36	6,56
34	2	simples	5	5x3	sim	11	3x3	131004	54	5,89
35	2	simples	5	5x3	sim	10	3x3	121004	54	23,76
36	2	simples	5	5x3	sim	9	3x3	121004	54	7,43
37	3	simples	1	2x1	sim	2	2x1	223993	108	16,4
38	3	simples	1	2x1	sim	1	1x1	449243	216	11,62
39	3	simples	2	2x2	sim	3	2x1	224432	108	17,93
40	3	simples	2	2x2	sim	2	2x1	224431	108	5,8
41	3	simples	3	3x2	sim	5	2x2	111901	54	18,6

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitichy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
42	3	simples	3	3x2	sim	4	2x2	111901	54	6,83
43	3	simples	3	3x2	sim	3	3x1	148819	72	5,35
44	3	simples	4	4x3	sim	10	3x3	49493	24	11,92
45	3	simples	4	4x3	sim	9	3x3	49493	24	5,88
46	3	simples	4	4x3	sim	8	4x2	88669	36	6,17
47	3	simples	4	4x3	sim	7	3x2	74495	36	7,05
48	3	simples	4	4x3	sim	6	3x2	74495	36	5,67
49	3	simples	5	5x3	sim	13	4x3	59053	24	17,3
50	3	simples	5	5x3	sim	12	4x3	59053	24	6,4
51	3	simples	5	5x3	sim	11	5x2	103260	36	6,45
52	3	simples	5	5x3	sim	10	5x2	103260	36	10,29
53	3	simples	5	5x3	sim	9	3x3	49493	24	8,07
54	4	simples	1	2x1	sim	2	2x1	10462	6	4,07
55	4	simples	1	2x1	sim	1	1x1	13514	12	7,01
56	4	simples	2	2x2	sim	3	3x1	7101	4	4,9
57	4	simples	2	2x2	sim	2	2x1	6702	6	6,93
58	4	simples	3	3x2	sim	5	2x2	5195	4	7,37
59	4	simples	3	3x2	sim	4	4x1	7575	4	5,16
60	4	simples	3	3x2	sim	3	3x1	7101	4	7,85
61	4	simples	4	4x3	sim	10	3x3	2315	2	16,31
62	4	simples	4	4x3	sim	9	3x3	2315	2	4,76
63	4	simples	4	4x3	sim	8	4x2	2576	3	6,79

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
64	4	simples	4	4x3	sim	7	3x2	5411	2	6,31
65	4	simples	4	4x3	sim	6	3x2	5411	2	5,25
66	4	simples	5	5x3	sim	13	4x3	2667	2	20,39
67	4	simples	5	5x3	sim	12	4x3	2667	2	5,17
68	4	simples	5	5x3	sim	11	5x2	2962	2	5,52
69	4	simples	5	5x3	sim	10	5x2	2962	2	5,83
70	4	simples	5	5x3	sim	9	3x3	2315	2	124,65
71	5	simples	1	2x1	sim	2	2x1	36634	24	17,99
72	5	simples	1	2x1	sim	1	1x1	73981	48	8,07
73	5	simples	2	2x2	sim	3	2x1	36634	24	18,68
74	5	simples	2	2x2	sim	2	2x1	36634	24	6,56
75	5	simples	3	3x2	sim	5	2x2	26279	16	21,4
76	5	simples	3	3x2	sim	4	4x1	26248	16	56,71
77	5	simples	3	3x2	sim	3	3x1	24340	16	6,17
78	5	simples	4	4x3	sim	10	5x2	14000	8	7,1
79	5	simples	4	4x3	sim	9	4x2	13200	8	26,03
80	5	simples	4	4x3	sim	8	4x2	12696	8	6,03
81	5	simples	4	4x3	sim	7	3x2	12017	8	7,76
82	5	simples	4	4x3	sim	6	3x2	12017	8	49,39
83	5	simples	5	5x3	sim	13	4x3	14543	8	19,33
84	5	simples	5	5x3	sim	12	6x2	15079	8	107,68
85	5	simples	5	5x3	sim	11	5x2	14000	8	213,62

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
86	5	simples	5	5x3	sim	10	5x2	14000	8	7,24
87	5	simples	5	5x3	sim	9	4x2	12969	8	6,9
88	1	simples	3	3x2	não	não	3x3	51866	18	15,386
89	1	simples	3	3x2	sim	não	3x3	51866	18	10,907
90	1	simples	3	3x2	não	2	2x1	272724	72	16,646
91	1	simples	3	3x2	sim	2	2x1	157662	60	16,28
93	1	simples	5	5x3	sim	não	5x5	17234	6	11,459
94	1	simples	5	3x2	não	2	2x1	272724	72	11,093
95	1	simples	5	5x3	sim	2	2x1	157662	60	17,368
96	2	simples	3	3x2	não	não	4x1	450530	126	17,185
97	2	simples	3	3x2	sim	não	3x2	170257	72	23,442
98	2	simples	3	3x2	não	2	2x1	501236	210	15,63
99	2	simples	3	3x2	sim	2	2x1	501236	210	33,06
100	2	simples	5	5x3	não	não	5x3	110946	36	15,056
101	2	simples	5	5x3	sim	não	5x3	110946	36	20,738
102	2	simples	5	5x3	não	2	2x1	501236	210	17,964
103	2	simples	5	5x3	sim	2	2x1	201236	210	39,57
104	3	simples	3	3x2	não	não	3x2	94589	36	21,67
105	3	simples	3	3x2	sim	não	3x2	74346	36	20,536
106	3	simples	3	3x2	não	2	2x1	197166	108	12,239
107	3	simples	3	3x2	sim	2	2x1	197166	108	30,085
108	3	simples	5	5x3	não	não	5x3	68788	24	38,026

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
109	3	simples	5	5x3	sim	não	5x3	68788	24	28,427
110	3	simples	5	5x3	não	2	2x1	197166	108	19,631
111	3	simples	5	5x3	sim	2	2x1	197166	108	27,275
112	1	simples	3		não	não				21,66
113	1	simples	3		não	não				4,59
114	1	simples	3		não	não				4,77
115	1	simples	3		não	não				5,75
116	1	simples	3		não	não				5,17
117	1	simples	3		não	não				4,67
118	1	simples	3		não	não				5,7
119	1	simples	3		não	não				5,69
120	1	simples	3		não	não				6,11
121	1	simples	3		não	não				89,75
122	1	simples	3		sim	não				4,72
123	1	simples	3		sim	não				4,31
124	1	simples	3		sim	não				4,49
125	1	simples	3		sim	não				4,3
126	1	simples	3		sim	não				5,1
127	1	simples	3		sim	não				7,02
128	1	simples	3		sim	não				59,16
129	1	simples	3		sim	não				4,43
130	1	simples	3		sim	não				5,94

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitichy Barbosa



Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
131	1	simples	3		sim	não				9,6
132	1	simples	3		não	2				17,64
133	1	simples	3		não	2				3,81
134	1	simples	3		não	2				3,76
135	1	simples	3		não	2				3,78
136	1	simples	3		não	2				61,28
137	1	simples	3		não	2				60,28
138	1	simples	3		não	2				3,73
139	1	simples	3		não	2				3,75
140	1	simples	3		não	2				4,58
141	1	simples	3		não	2				3,85
142	1	simples	3		sim	2				4,65
143	1	simples	3		sim	2				4,29
144	1	simples	3		sim	2				64,94
145	1	simples	3		sim	2				58,65
146	1	simples	3		sim	2				4,55
147	1	simples	3		sim	2				4,55
148	1	simples	3		sim	2				4,63
149	1	simples	3		sim	2				4,63
150	1	simples	3		sim	2				6,81
151	1	simples	3		sim	2				5,18
152	1	simples	5		não	não				3,67

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
153	1	simples	5		não	não				43,91
154	1	simples	5		não	não				42,37
155	1	simples	5		não	não				3,87
156	1	simples	5		não	não				4,19
157	1	simples	5		não	não				3,46
158	1	simples	5		não	não				3,89
159	1	simples	5		não	não				14,92
160	1	simples	5		não	não				27,15
161	1	simples	5		não	não				15,63
162	1	simples	5		sim	não				4,19
163	1	simples	5		sim	não				5,03
164	1	simples	5		sim	não				4,19
165	1	simples	5		sim	não				4,34
166	1	simples	5		sim	não				4,6
167	1	simples	5		sim	não				48,24
168	1	simples	5		sim	não				17,2
169	1	simples	5		sim	não				4,64
170	1	simples	5		sim	não				4,43
171	1	simples	5		sim	não				17,73
172	1	simples	5		não	2				3,54
173	1	simples	5		não	2				3,8
174	1	simples	5		não	2				3,57

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
175	1	simples	5		não	2				36,4
176	1	simples	5		não	2				3,43
177	1	simples	5		não	2				3,63
178	1	simples	5		não	2				3,74
179	1	simples	5		não	2				45,4
180	1	simples	5		não	2				3,73
181	1	simples	5		não	2				3,69
182	1	simples	5		sim	2				4,68
183	1	simples	5		sim	2				56,02
184	1	simples	5		sim	2				55,49
185	1	simples	5		sim	2				5,32
186	1	simples	5		sim	2				4,71
187	1	simples	5		sim	2				4,51
188	1	simples	5		sim	2				4,48
189	1	simples	5		sim	2				27,9
190	1	simples	5		sim	2				4,68
191	1	simples	5		sim	2				5,89
192	2	simples	3		não	não				14,13
193	2	simples	3		não	não				5,36
194	2	simples	3		não	não				4,04
195	2	simples	3		não	não				3,95
196	2	simples	3		não	não				51,21

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
197	2	simples	3		não	não				45,8
198	2	simples	3		não	não				5,33
199	2	simples	3		não	não				4,09
200	2	simples	3		não	não				4,91
201	2	simples	3		não	não				33,03
202	2	simples	3		sim	não				4,94
203	2	simples	3		sim	não				4,69
204	2	simples	3		sim	não				84,41
205	2	simples	3		sim	não				51,89
206	2	simples	3		sim	não				4,81
207	2	simples	3		sim	não				4,93
208	2	simples	3		sim	não				6,17
209	2	simples	3		sim	não				61,18
210	2	simples	3		sim	não				4,87
211	2	simples	3		sim	não				6,53
212	2	simples	3		não	2				4,2
213	2	simples	3		não	2				4,17
214	2	simples	3		não	2				61,53
215	2	simples	3		não	2				4,37
216	2	simples	3		não	2				4,21
217	2	simples	3		não	2				4,64
218	2	simples	3		não	2				5,24

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitichy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
219	2	simples	3		não	2				59,73
220	2	simples	3		não	2				4,02
221	2	simples	3		não	2				4,19
222	2	simples	3		sim	2				5,02
223	2	simples	3		sim	2				85,89
224	2	simples	3		sim	2				60,69
225	2	simples	3		sim	2				5,34
226	2	simples	3		sim	2				5,24
227	2	simples	3		sim	2				4,9
228	2	simples	3		sim	2				5,1
229	2	simples	3		sim	2				5,23
230	2	simples	3		sim	2				76,23
231	2	simples	3		sim	2				76,42
232	2	simples	5		não	não				189,57
233	2	simples	5		não	não				17,97
234	2	simples	5		não	não				6,3
235	2	simples	5		não	não				6,24
236	2	simples	5		não	não				46,84
237	2	simples	5		não	não				7,29
238	2	simples	5		não	não				5,51
239	2	simples	5		não	não				99,33
240	2	simples	5		não	não				5,22

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
241	2	simples	5		não	não				6,69
242	2	simples	5		sim	não				44,36
243	2	simples	5		sim	não				13,72
244	2	simples	5		sim	não				124,59
245	2	simples	5		sim	não				18,69
246	2	simples	5		sim	não				7,38
247	2	simples	5		sim	não				10
248	2	simples	5		sim	não				6,75
249	2	simples	5		sim	não				7,6
250	2	simples	5		sim	não				44,17
251	2	simples	5		sim	não				7,01
252	2	simples	5		não	2				24,12
253	2	simples	5		não	2				5,92
254	2	simples	5		não	2				6,83
255	2	simples	5		não	2				73,02
256	2	simples	5		não	2				6,45
257	2	simples	5		não	2				5,89
258	2	simples	5		não	2				7,1
259	2	simples	5		não	2				55,88
260	2	simples	5		não	2				5,81
261	2	simples	5		não	2				5,29
262	2	simples	5		sim	2				20,9

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
263	2	simples	5		sim	2				6,89
264	2	simples	5		sim	2				6,93
265	2	simples	5		sim	2				114,86
266	2	simples	5		sim	2				31,74
267	2	simples	5		sim	2				6,52
268	2	simples	5		sim	2				7,44
269	2	simples	5		sim	2				7,96
270	2	simples	5		sim	2				7,7
271	2	simples	5		sim	2				184,76
272	3	simples	3		não	não				17,9
273	3	simples	3		não	não				5,71
274	3	simples	3		não	não				5,28
275	3	simples	3		não	não				85,7
276	3	simples	3		não	não				5,98
277	3	simples	3		não	não				6,8
278	3	simples	3		não	não				7,09
279	3	simples	3		não	não				6,43
280	3	simples	3		não	não				71,06
281	3	simples	3		não	não				4,75
282	3	simples	3		sim	não				52,43
283	3	simples	3		sim	não				6,11
284	3	simples	3		sim	não				20,74

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
285	3	simples	3		sim	não				6,44
286	3	simples	3		sim	não				6,55
287	3	simples	3		sim	não				18,1
288	3	simples	3		sim	não				6,68
289	3	simples	3		sim	não				6,86
290	3	simples	3		sim	não				73,79
291	3	simples	3		sim	não				7,93
292	3	simples	3		não	2				6,42
293	3	simples	3		não	2				17,86
295	3	simples	3		não	2				5,82
296	3	simples	3		não	2				53,93
297	3	simples	3		não	2				5,85
298	3	simples	3		não	2				6,04
299	3	simples	3		não	2				7,89
300	3	simples	3		não	2				5,9
301	3	simples	3		não	2				6,3
302	3	simples	3		sim	2				67,8
303	3	simples	3		sim	2				6,92
304	3	simples	3		sim	2				7,3
305	3	simples	3		sim	2				6,58
306	3	simples	3		sim	2				80,81
307	3	simples	3		sim	2				8,76

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitichy Barbosa



Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
308	3	simples	3		sim	2				8,8
309	3	simples	3		sim	2				7,9
310	3	simples	3		sim	2				97,7
311	3	simples	3		sim	2				8,01
312	3	simples	5		não	não				189,57
313	3	simples	5		não	não				17,97
314	3	simples	5		não	não				6,3
315	3	simples	5		não	não				6,24
316	3	simples	5		não	não				46,84
317	3	simples	5		não	não				7,29
318	3	simples	5		não	não				5,51
319	3	simples	5		não	não				99,33
320	3	simples	5		não	não				5,22
321	3	simples	5		não	não				6,69
322	3	simples	5		sim	não				44,36
323	3	simples	5		sim	não				13,72
324	3	simples	5		sim	não				124,59
325	3	simples	5		sim	não				18,69
326	3	simples	5		sim	não				7,38
327	3	simples	5		sim	não				10
328	3	simples	5		sim	não				6,75
329	3	simples	5		sim	não				7,6

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
330	3	simples	5		sim	não				44,17
331	3	simples	5		sim	não				7,01
332	3	simples	5		não	2				24,12
333	3	simples	5		não	2				5,92
334	3	simples	5		não	2				6,83
335	3	simples	5		não	2				73,02
336	3	simples	5		não	2				6,45
337	3	simples	5		não	2				5,89
338	3	simples	5		não	2				7,1
339	3	simples	5		não	2				55,88
340	3	simples	5		não	2				5,81
341	3	simples	5		não	2				5,29
342	3	simples	5		sim	2				10,28
343	3	simples	5		sim	2				6,54
344	3	simples	5		sim	2				101,98
345	3	simples	5		sim	2				8,59
346	3	simples	5		sim	2				8,47
347	3	simples	5		sim	2				8,26
348	3	simples	5		sim	2				8,6
349	3	simples	5		sim	2				103,47
350	3	simples	5		sim	2				8,78
351	3	simples	5		sim	2				7,78

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
352	3	simples		3x2	não	não				29,9
353	3	simples		3x2	não	não				5,46
354	3	simples		3x2	não	não				5,79
355	3	simples		3x2	não	não				6,59
356	3	simples		3x2	não	não				6,67
357	3	simples		3x2	não	não				4,89
358	3	simples		3x2	não	não				47,5
359	3	simples		3x2	não	não				6,6
360	3	simples		3x2	não	não				6,36
361	3	simples		3x2	não	não				6,49
362	7	duplo		3x2	não	não				84,28
363	7	duplo		3x2	não	não				11,59
364	7	duplo		3x2	não	não				9,18
365	7	duplo		3x2	não	não				11,12
366	7	duplo		3x2	não	não				10,08
367	7	duplo		3x2	não	não				11,07
368	7	duplo		3x2	não	não				90,31
369	7	duplo		3x2	não	não				10,45
370	7	duplo		3x2	não	não				9,55
371	7	duplo		3x2	não	não				12,5
372	11	4 blocos		3x2	não	não				30,03
373	11	4 blocos		3x2	não	não				198,62

O problema de empacotamento de paletes do produtor com restrição de garras manipuladoras – Uma abordagem heurística.

João Pedro Woitchy Barbosa

Teste	Problema	Complexidade	Nº Manif.	Manip. utilizado	Capacidade de Rotacionar	Restrição de peso	Melhor Manip.	Distância total (u.c.)	Nº Mov.	Tempo de Cálculo (ms)
374	11	4 blocos		3x2	não	não				22,75
375	11	4 blocos		3x2	não	não				95,57
376	11	4 blocos		3x2	não	não				21,9
377	11	4 blocos		3x2	não	não				19,98
378	11	4 blocos		3x2	não	não				28,7
379	11	4 blocos		3x2	não	não				21,66
380	11	4 blocos		3x2	não	não				22,02
381	11	4 blocos		3x2	não	não				21,91
382	13	5 blocos		3x2	não	não				30,77
383	13	5 blocos		3x2	não	não				29,97
384	13	5 blocos		3x2	não	não				27,13
385	13	5 blocos		3x2	não	não				28,98
386	13	5 blocos		3x2	não	não				26,98
387	13	5 blocos		3x2	não	não				248,02
388	13	5 blocos		3x2	não	não				27,71
389	13	5 blocos		3x2	não	não				29,02
390	13	5 blocos		3x2	não	não				263,05
391	13	5 blocos		3x2	não	não				29,75